



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA REALIZACIÓN DE ESTUDIOS
GEOTÉCNICOS DE OBRAS MARÍTIMAS EN CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MAGDALENA PAZ PRADO GARCÍA

PROFESOR GUÍA:

ROBERTO GESCHE SCHÜLER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

HUGO GERARDO BAESLER CORREA
JOSÉ ANTONIO ALDUNATE RIVERA

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniera Civil mención
Estructuras, Construcción y Geotecnia.
POR: Magdalena Paz Prado García
FECHA: 17/04/2018
PROFESOR GUÍA: Roberto Gesche Schüler

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA REALIZACIÓN DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS DE OBRAS MARÍTIMAS EN CHILE

Chile se caracteriza por ser un país con más de 6 mil kilómetros de borde costero, condición que aprovecha construyendo puertos para el comercio nacional e internacional. Y todo proyecto debe realizar un estudio geotécnico con el objetivo de determinar la naturaleza del terreno, sus propiedades, y cómo cimentar la obra.

El objetivo de la presente memoria es hacer una revisión de la metodología de la exploración geotécnica para obras marítimas en Chile, y evaluar sus posibles mejoras. Al mejorar la exploración, se reducirá incertidumbre, permitiendo la generación infraestructura más económica.

Se comenzó estudiando la manera en que se realizan los estudios geotécnicos marítimos, revisando normativa y/o manuales nacionales y se comparó con el modo en el que se realizan estos trabajos en otros países. Luego, se investigó la factibilidad de introducir algunas de las metodologías extranjeras con aplicación en Chile y se buscó obtener los costos de la metodología sugerida. A nivel internacional los ensayos más utilizados corresponden a CPT y CPTU, seguidos de Corte por Veleta. Y en Chile se utiliza SPT en sondajes, sin tecnologías adicionales como SPT Analyzer, para medición de energía, ni PS Logging, para medición de velocidades de ondas sísmicas.

Se generó una propuesta metodológica en función de la tipología de obra y su ubicación (zona abrigada o mar abierto). Entre los ensayos propuestos se pueden encontrar CPTU, SCPT, Corte por Veleta, PS Logging, Reflexión UHR, SPT Analyzer, Presiómetro y toma de muestras con tubos Shelby. Además, se propone la creación de una base de datos nacional que contenga los informes de mecánica de suelos de estudios anteriores, con la intención de que en los proyectos exista un estudio de gabinete previo a la selección de los puntos de exploración.

Al analizar los costos se obtuvo que los valores de los ensayos CPTU y SCPT son similares, por lo que se recomienda el ensayo con medición de onda de corte. Al comparar SPT, con medición de energía y de ondas de corte, con CPTU para una columna de agua cercana a 10 metros, resulta más conveniente económicamente el uso de CPTU, mientras que para una columna de agua cercana a 30 metros resulta más óptimo el ensayo SPT con SPT Analyzer y PS Logging. Finalmente, al comparar los costos de una obra con campaña geotécnica y los costos de aplicar los ensayos propuestos en este trabajo se definió que una campaña geotécnica más amplia no genera grandes diferencias en los costos finales de proyecto, y permite reducir la incertidumbre, generando infraestructura más económica.

*A Trinidad,
el pequeño motor que me
impulsó a seguir
adelante cada día.*

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo me gustaría agradecer a mis profesores, por todo el soporte que me brindaron durante este proceso. Al profesor Roberto, gracias por su paciencia y compromiso, que me permitieron llevar a buen puerto este trabajo. A los profesores Hugo y José Antonio que ayudaron direccionar mi memoria de título, brindándome un enfoque distinto. También al profesor Beltrán, en quien siempre encontré apoyo dentro del Departamento de Ingeniería Civil.

Gracias a mis papás, Marisol y Ramón, que sin importar cuantas veces me he caído, siempre han estado ahí para ayudarme a levantarme y a continuar adelante. Que me enseñaron a ser perseverante y a luchar por mis sueños cueste lo que cueste. Gracias por ser ese pilar que me sostiene y por el amor incondicional que siempre me han dado. Los quiero muchísimo.

A Sebastián, por todo el cariño, los abrazos y regalones. Por creer siempre en mí, aunque en algunos momentos ni yo me creyera capaz. A mi Trinita hermosa, que con su alegría y amor me contagia, y me impulsa a dar lo mejor de mí cada día. Seba, Trinita, han sido lo mejor que me pasó durante mi etapa universitaria, y doy gracias a Dios por tener la posibilidad de compartir mi vida con ustedes.

A mis hermanos, por estar ahí para darme una garra y un rugido siempre que lo necesite. A mi abuelita Guaco y a mi tía Moni, por todas esas onces compartidas, por estar siempre ahí para cuidar a la pequeña y por hacerse el tiempo de escuchar mis venturas y desventuras.

A Maria Elena y Manuel, por toda la preocupación y apoyo que me dieron durante mi etapa universitaria, siempre ayudando a desempeñarme de la mejor manera como estudiante y mamá.

Y a toda la gente linda que conocí durante mi etapa universitaria. A Juan, Deiniel, Vivi, Coni, Cono, Mati y Yeivier, que estuvieron presentes desde el día uno. A la Feña y la Vale, por todas esos préstamos de cuadernos, tardes de estudio y cafés compartidos, civil no hubiese sido lo mismo sin ustedes. Y a los chiquillos de la geopecera, gracias por todas las risas y buenos momentos, hicieron más amena la última etapa de la carrera.

Por último, me gustaría agradecerles a Fugro, a Geovenor y a la DOP, pues sin sus aportes el desarrollo de este trabajo no hubiese sido posible.

Muchas gracias a todos!

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 DESARROLLO DEL TRABAJO DE TÍTULO.....	3
2. INFRAESTRUCTURA MARÍTIMA PORTUARIA	4
2.1 OBRAS DE ABRIGO	5
2.1.1 ROMPEOLAS DE GRAVEDAD	5
2.1.2 ROMPEOLAS FLOTANTES	6
2.1.3 ROMPEOLAS SUMERGIDOS.....	7
2.2 OBRAS DE PROTECCIÓN	7
2.2.1 MUROS COSTEROS.....	7
2.2.2 PROTECCIÓN DE EROSIÓN Y SEDIMENTOS.....	8
2.3 OBRAS DE ATRAQUE, AMARRE Y FONDEO.....	9
2.3.1 MUELLES	9
2.3.2 MONOBOYAS Y MULTIBOYAS	12
2.3.3 DUQUES DE ALBA.....	12
2.4 OBRAS DE DRAGADO.....	13
2.5 DUCTOS	13
2.6 ESTRUCTURAS OFFSHORE.....	13
2.7 OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA TSUNAMIS.....	14
2.8 OBRAS COMPLEMENTARIAS	14
3. CONTEXTO NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA Y EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA	15
3.1 TIPOS DE OBRAS EXISTENTES EN CHILE	15
3.2 MÉTODOS DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA EN CHILE	18
3.2.1 NORMA CHILENA NCH 1508: GEOTÉCNICA – ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS.....	19
3.2.2 NORMA CHILENA NCH 2369: DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS E INSTALACIONES INDUSTRIALES	26
3.2.3 GUÍA DOP.....	28
3.2.4 RECOMENDACIONES DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS DE CHILE (GUÍA DOP, 2013).....	38
3.3 LICITACIONES CHILENAS DE INFRAESTRUCTURA PORTUARIA	44
3.4 COMUNICACIÓN CON MANDANTES, CONSULTORES Y CONTRATISTAS.....	46

4.	CONTEXTO INTERNACIONAL DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA.....	48
4.1	HERRAMIENTAS DE PERFORACIÓN.....	49
4.1.1	PLATAFORMAS FLOTANTES O SEMI-SUMERGIBLES.....	49
4.1.2	PLATAFORMAS ELEVABLES (PLATAFORMAS JACK-UP).....	50
4.1.3	BARCOS DE PERFORACIÓN GEOTÉCNICA (DRILL SHIPS).....	50
4.1.4	PLATAFORMA GEOFÍSICA OPERADA REMOTAMENTE.....	51
4.2	TÉCNICAS DE MUESTREO.....	51
4.2.1	HERRAMIENTAS DE MUESTREO.....	52
4.2.2	PROCEDIMIENTOS HABITUALES DE TOMA DE MUESTRAS EN SONDAJES.....	55
4.3	TÉCNICAS GEOFÍSICAS.....	56
4.3.1	GEOFÍSICA PARA ESTUDIOS BATIMÉTRICOS.....	56
4.3.2	GEOFÍSICA PARA ESTUDIOS GEOTÉCNICOS.....	59
4.4	TÉCNICAS GEOTÉCNICAS.....	62
4.4.1	ENSAYOS DE PENETRACIÓN DE CONO (CPT) EN FONDO MARINO.....	64
4.4.2	CPT DINÁMICO:.....	66
4.4.3	ENSAYO DEL MINICONO.....	66
4.4.4	ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT).....	66
4.4.5	ENSAYO DE CORTE POR VELETA.....	66
4.4.6	ENSAYOS DE PENETRACIÓN T-BAR Y BALL.....	67
4.4.7	PRESIOMETRO.....	67
4.4.8	DILATOMETRO.....	68
4.4.9	SWEDISH WEIGHT SOUNDING TEST (WST).....	69
4.4.10	LLT (BOREHOLE LATERAL LOAD TEST).....	70
4.4.11	BAT/DGP.....	70
5.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROSPECCIONES Y PROPUESTA METODOLÓGICA DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS DE OBRAS MARÍTIMAS.....	72
5.1	ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROSPECCIONES.....	72
5.2	PROPUESTA METODOLÓGICA DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS DE OBRAS MARÍTIMAS.....	75
5.2.1	BASE DE DATOS NACIONAL.....	75
5.2.2	ADICIÓN Y CAMBIOS DE METODOLOGÍAS DE EXPLORACIÓN IN-SITU.....	79
5.2.3	RECOMENDACIONES ADICIONALES.....	83

6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE FACTIBILIDAD DE PROPUESTA DE PROSPECCIONES	85
6.1 FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LA PROPUESTA	85
6.2 ANÁLISIS ECONÓMICO	86
6.2.1 CASO DE ESTUDIO	90
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
7.1 CONCLUSIONES.....	94
7.2 RECOMENDACIONES	96
8. BIBLIOGRAFÍA	97

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones máximas para buques permitidas en puertos a largo del país. (Fuente: MOP, 2005).....	15
Tabla 2. Tabla resumen de número de caletas artesanales según provincia en Chile. (Fuente: DS 240, ministerio de defensa nacional, subsecretaría marina, 2014).	16
Tabla 3. Definición de los tipos de suelo de fundación (Fuente: Versión en consulta pública de norma NCh 2369, 2018).....	27
Tabla 4. Definición de siglas y prospecciones mínimas, sus alcances en profundidad y sus resultados. (Fuente: DOP, 2013).....	39
Tabla 5. Prospecciones mínimas para obras de abrigo y obras de protección. (Fuente: DOP, 2013).....	40
Tabla 6. Prospecciones mínimas para obras de atraque y amarra, y para rampas. (Fuente: DOP, 2013)	41
Tabla 7. Resumen de prospecciones (Modificada de: DOP, 2013).....	43
Tabla 8. Selección de licitaciones de infraestructura portuaria Chilenas estudiadas. (Fuente: www.mercadopublico.cl [Consulta enero 2017]).	44
Tabla 9. Continuación de Selección de licitaciones de infraestructura portuaria Chilenas estudiadas. (Fuente: www.mercadopublico.cl [Consulta Enero 2017]).	45
Tabla 10. Continuación de Selección de licitaciones de infraestructura portuaria Chilenas estudiadas. (Fuente: www.mercadopublico.cl [Consulta Enero 2017]).	46
Tabla 11. Recomendaciones y Normativa internacional estudiada. (Fuente: Elaboración Propia)	48
Tabla 12. Ensayos recomendados en las normas, guías y manuales estudiados. (Fuente: Elaboración Propia).....	71
Tabla 13. Precios unitarios de ensayos en unidad de fomento (UF)	87
Tabla 14. Comparación de costos aproximados en unidades de fomento (UF) para distintas metodologías de exploración, suponiendo un sondaje de 30 metros de profundidad, a distintas columnas de agua.	88
Tabla 15. Tabla resumen de la variación porcentual al comparar prospección de menor valor con prospección de mayor valor.	89
Tabla 16. Tabla resumen de la variación porcentual al comparar prospección de menor valor con prospección de mayor valor (Continuación).....	90
Tabla 17. Costos asociados a la construcción y la campaña geotécnica del proyecto Puerto Cisne (Fuente: Trabajo académico de diplomado “Mecánica de Suelos Aplicada”, 2016).....	91
Tabla 18. Presupuesto para el proyecto Puerto Cisnes mediante la metodología propuesta en este trabajo de título.	92
Tabla 19. Comparación de costos totales del proyecto con las diferentes campañas de exploración geotécnica.	93
Tabla 20. Prospecciones mínimas para obras de dragado y ductos. (Fuente: DOP, 2013)	102

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Fases de un proyecto (Fuente: Elaboración Propia)	2
Figura 2. Diagrama de la infraestructura portuaria (Fuente: DOP, 2013).	4
Figura 3. Estructura de un rompeolas en talud (Anta, 2013)	5
Figura 4. Estructura de un dique vertical (Fuente: Gobierno de España, 2008).	6
Figura 5. Rompeolas flotante (Fuente: DOP, 2013).	7
Figura 6. Estructura de Rompeolas sumergido (Fuente: DOP, 2013).	7
Figura 7. Muro costero en talud (Fuente: DOP, 2013).	8
Figura 8. Rompeolas Exento en Bibione Italia (Fuente: Google Earth).	8
Figura 9. Espigones en Costacabana, España (Fuente: Google Earth).	9
Figura 10. Muelle Vergara, Viña del Mar. Ejemplo de Muelle transparente (Fuente: Archivos propios).	10
Figura 11. Muelle opaco (fuente: DOP, 2013).	10
Figura 12. Muelle de penetración. Puerto Tocopilla electroandina. (Fuente: DOP, 2005)	11
Figura 13. Muelle marginal. Empresa Portuaria Coquimbo (DOP, 2005).	11
Figura 14. Monoboya con buque en proceso de carga petrolífera (Fuente: Almazán, Palomino y García, 2000).	12
Figura 15. Duque de Alba en el Puerto Palma de Mallorca, España (Fuente: Autoridad portuaria de Baleares, http://www.portsdebalears.com/es/ [consulta 22-11-2017]).	12
Figura 16. Ducto de aducción (Fuente: DOP, 2013).	13
Figura 17. Plataforma Jack Up tipo ASTRA (Fuente: http://www.eurasiadrilling.com/operations/offshore/jack-up-rigs/	14
Figura 18. Centro de cultivo de salmón en la Región de Aysén. (Fuente: http://www.aqua.cl/2015/12/21/camanchaca-inauguro-moderno-ponton-que-desaliniza-agua-de-mar-para-sus-procesos/#)	17
Figura 19. Zanja de exploración Geotécnica (Fuente: Day, 2006).	21
Figura 20. Sondaje Geotécnico. (Fuente: Lemco, Laboratorio de Ensaye de Materiales y control de Obras, 2018)	22
Figura 21. Esquema de ensayo sísmico. Se pueden apreciar las ondas directas (Superficiales), las ondas reflejadas, y las refractadas, estas últimas corresponden a las medidas durante el ensayo (Fuente: http://www.geoarsrl.com/tomografia-sismica-de-refraccion/ [Consulta 10-01-2018]).	23
Figura 22. Esquema de exploración geofísica mediante Crosshole. Se pueden observar 3 perforaciones, una con una fuente y 2 con receptores de ondas.	24
Figura 23. Esquema de ensayo Downhole (Fuente: https://basaltoit.com/down-hole [Consulta 10-01-2018]).	25
Figura 24. Modelo explicativo de exploración geofísica mediante el método PS Logging. (Fuente: Igeotest. Geoscience Group,2016)	29
Figura 25. Herramienta utilizada para ensayo de placa de carga, en su versión dinámica. (Fuente: Terratest).	30
Figura 26. Esquema de Ensayo Lugeon (Fuente: http://www.geotechdata.info/geotest/Lugeon_test.html [Consulta 10-01-2018])	31

Figura 27. Dimensiones de la cuchara normalizada SPT (Fuente: ASTM D1586, 2011).	32
Figura 28. Esquema del equipo según norma ASTM (Fuente: ASTM D6951, 2003)	33
Figura 29. Dimensiones típicas del cono para el ensayo CPT (Fuente: ASTM D5778, 2012)	34
Figura 30. Configuración del ensayo CPT estático versus las versiones del piezocono. De izquierda a derecha se observa el cono CPT estático, el cono CPTU con transductores de presión de poros en la punta, el cono CPTU con transductores de presión de poros en la manga y finalmente el cono CPTU con el transductor de presión de poros en la manga y dimensiones alternativas (Fuente: ASTM D5778, 2012).	35
Figura 31. Esquema de ensayo presiométrico (Fuente: http://www.codexsa.com/Geotecnia-y-geologia-Codexsa [Consulta 10-01-2018]).	36
Figura 32. Ensayo de carga en pilotes. (Fuente: CFT & Asociados. Ensayos y Pruebas de Pilotes, 2012).	36
Figura 33. Plataforma elevable tipo Jack-Up (Fuente: ISSMGE, 2005).	50
Figura 34. Barco de exploración Fugro Discovery (Fuente: www.fugro.com [Consulta 29-03-2017]).	51
Figura 35. Muestreador de gravedad, se puede observar (1) Punto del cual se eleva el peso, (2) el peso, (3) almacenamiento de muestra y (4) cortador de muestra. (Modificada de: ISSGME, 2005)	53
Figura 36. Muestreador de caja (Fuente: ISSGME, 2005).	54
Figura 37. Izquierda, mecanismo de medición de la profundidad o forma del fondo marino Echosounder. Derecha, mecanismo de medición del fondo marino Swath Batimetry. (Fuente: https://woodshole.er.usgs.gov/ [Consulta Junio 2017]).	57
Figura 38. Diagrama explicativo del método de batimetría mediante LiDAR. (Modificada de: http://aucillaresearchinstitute.org/?page_id=134 [Consulta Junio 2017]).	58
Figura 39. Diagrama explicativo del método de batimetría por Sidescan Sonar (Fuente: https://woodshole.er.usgs.gov/ [Consulta Junio 2017])	58
Figura 40. Diagrama del funcionamiento de reflexión sísmica (Fuente: https://woodshole.er.usgs.gov/operations/sfmapping/ [Consulta Junio 2017]).	60
Figura 41. Esquema de medición por refracción sísmica. (Modificada de: ISSMGE, 2005).	61
Figura 42. Esquema de resistividad eléctrica. (Fuente: http://oemg-global.com/aquares-resistivity-surveys/ [Consulta 4-12-2017]).	62
Figura 43. Esquemas de ensayo cono sísmico, vista en sección transversal (A) Receptor único. (B) Receptor dual. (Fuente: ASTM D7400, 2014)	65
Figura 44. Geometría observada de la veleta utilizada en el ensayo (ASTM D2573, 2015)	67
Figura 45. Herramienta utilizada para los ensayos T-Bar y Ball Probe (Fuente: ISSMGE, 2005).	67
Figura 46. Configuración y dimensiones de la placa utilizada para el ensayo del dilatómetro plano (Fuente: Eurocódigo 7, 2002)	68
Figura 47. Punta para el ensayo SWS. (Fuente: Eurocódigo 7, 2002).	69

Figura 48. Diagrama de exploración para Obras de Abrigo (Rompeolas de Gravedad). (Fuente: DOP, 2013).	72
Figura 49. Diagrama de exploración para Obras de protección (Espigones, rompeolas exento y muros costeros). (fuente: DOP, 2013).	73
Figura 50. Diagrama de exploración para Terminales de Atraque (Muelle Marginal). (fuente: DOP, 2013).....	73
Figura 51. Diagrama de exploración para terminales de atraque (muelle de penetración). (Fuente: DOP, 2013).	74
Figura 52. Diagrama de exploración para rampas. (fuente: DOP, 2013).	74
Figura 53. Resultados de un ensayo de Reflexión UHR (Fuente: Imagen facilitada por Fugro Chile).....	79
Figura 54. Diagrama de exploración propuesta para Obras de Abrigo (Rompeolas de Gravedad). (Fuente: Modificado de MOP, 2013).	81
Figura 55. Diagrama de exploración propuesta para Obras de Protección (Espigones, Rompeolas Exento y Muros Costeros). (Fuente: Modificado de MOP, 2013).	82
Figura 56. Diagrama de exploración propuesta para Terminales de Atraque (Muelle Marginal). (Fuente: Modificado de MOP, 2013).	82
Figura 57. Diagrama de exploración propuesta para Terminales de Atraque (Muelle de Penetración). (Fuente: Modificado de MOP, 2013).	83
Figura 58. Diagrama de exploración propuesta para Rampas. (Fuente: Modificado de MOP, 2013).	83
Figura 59. Ubicación general del proyecto (Fuente: Modificado de Google Earth) ...	90

1. INTRODUCCIÓN

Chile es un país con un amplio borde costero, debido a esto, la explotación del mismo resulta necesaria. Esto se realiza de diversas maneras, como por ejemplo, al construir obras marítimas para fomentar el comercio nacional e internacional, al crear espacios de recreación o turismo, designando ciertos sectores para pesca artesanal, otros para energía o simplemente mediante la construcción de miradores para aprovechar el paisaje, entre otros tipos de intervenciones.

La cámara Chilena de la Construcción ha ampliado el concepto de borde costero, incluyendo los bordes costeros lacustres y fluviales en su definición: “Zona geográfica donde se produce la unión de tierra y agua. Su espesor es variable, de acuerdo a las especificidades de carácter local”. Bajo este concepto, se plantea que Chile cuenta con 83.850 Km disponibles de zona costera, incluyendo la parte continental, islas, lagos y ríos.

El borde costero nacional está principalmente utilizado por empresas portuarias estatales y privadas, coexistiendo 24 puertos comerciales de uso público (Fuente: MOP, 2009). Adicionalmente, se cuenta con caletas pesqueras artesanales, e industriales, sectores de embarque y desembarque de turistas entre otros. Es por esto que la oferta de infraestructura portuaria y de borde costero a nivel nacional se puede dividir en 5 grandes grupos, los cuales son:

- Comercio Exterior y Cabotaje: En el sector norte del país, dedicados al transporte de minerales, en el centro a productos agrícolas y contenedores, mientras que en el sur principalmente a derivados de la madera. Adicionalmente en la zona austral de utilizan como medio de transferencia de vehículos y pasajeros.
- Pesca Artesanal y Acuicultura
- Turismo de Cruceros y Deportes Náuticos
- Conectividad Austral e Insular
- Borde costero: incluyendo áreas de paseo, miradores, zonas de descanso, entre otros.

1.1 MOTIVACIÓN

Para la realización de cualquier tipo de obra, se desarrollan una serie de etapas. Comienzan con una ingeniería conceptual, luego ingeniería básica, para terminar con ingeniería de detalle. Cada etapa tiene una serie de objetivos, los cuales pueden ser apreciados en la Figura 1. Durante la segunda etapa, la ingeniería básica, se estudian las propiedades, naturaleza y comportamiento del suelo en el cual se va a construir.

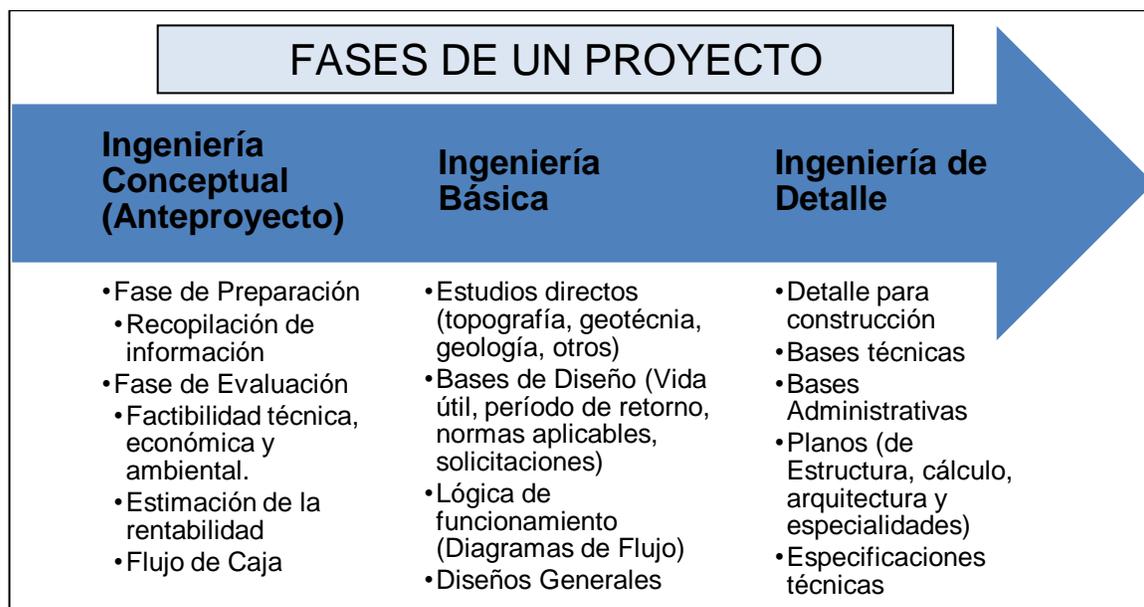


FIGURA 1. FASES DE UN PROYECTO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

En particular para las obras marítimas, el proceso de estudio es distinto al de obras terrestres, y la normativa en Chile no define específicamente los métodos a utilizar para el estudio ni los ensayos asociados. Sin embargo existen manuales con recomendaciones que permiten conocer las exploraciones mínimas a realizar. Por otro lado, existen pocas empresas contratistas que se especialicen en realizar estudios marítimos, lo que lleva a una baja oferta a la hora de realizarse licitaciones públicas, quedando muchas desiertas (Fuente: Mercado Público).

Ante esta situación, se busca una nueva metodología factible de implementar en Chile, que cumpla con la obtención de los datos requeridos del suelo e idealmente tenga un costo similar o menor a los de las metodologías que se aplican actualmente.

Para el desarrollo de este trabajo será necesario el manejo de una variedad de ensayos que se realicen en estudios de caracterización de suelos, incluyendo su factibilidad de utilización en función del tipo de suelo y ubicación. Además, se requerirá del manejo de los parámetros que se obtienen del suelo posterior a la exploración.

Esta propuesta deberá considerar ensayos y/o prospecciones geotécnicas y geofísicas que estudien el comportamiento del suelo en sus distintos estados.

1.2 OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo de título son los siguientes:

Objetivos Generales

- Proponer una mejora metodológica para Chile en la realización de estudios geotécnicos de obras marítimas

Objetivos Específicos

- Evaluar la metodología de exploración geotécnica utilizada actualmente en Chile para obras marítimas.
- Estudiar las metodologías de exploración geotécnica marítima en el extranjero.
- Realizar un estudio de factibilidad técnica de las metodologías extranjeras en Chile.
- Determinar los costos e impactos asociados a las metodologías factibles de exploración geotécnica en Chile.

1.3 DESARROLLO DEL TRABAJO DE TÍTULO

En primer lugar se revisará la “Guía de Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras”, generada por la Dirección de Obras Portuarias (DOP), del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile (2013), en conjunto con distintos comités conformados por profesionales relacionados con el ámbito marítimo portuario, tanto públicos como privados; esta guía, representa los lineamientos generales a nivel país a la hora del desarrollo de un proyecto marítimo, entregando un estándar nacional para estas situaciones.

Seguido de la revisión del manual existente en Chile, se revisarán una serie de licitaciones correspondientes a estudios geotécnicos de obras marítimas. En paralelo se buscará información de empresas que realicen estudios de este ámbito, su metodología, maquinaria que disponen, y tipos de ensayos que realizan.

Luego, se realizará un estudio de las metodologías de exploración geotécnica y de mecánica de suelos utilizados en el extranjero. Los países revisados corresponden a los siguientes: Japón, Estados Unidos, España, Reino Unido, Noruega Alemania y Australia, además se revisaron manuales de dos organizaciones internacionales: *The World Association for Waterborne Transport Infrastructure* (PIANC) y *The International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (ISSMGE).

Por último, se estudiará la factibilidad de aplicar las metodologías extranjeras seleccionadas, en Chile, revisando los tipos de suelos en los cuales es utilizable cada prospección y/o ensayo. En función de este análisis, se determinarán los costos asociados a las metodologías de estudio factibles en Chile y los impactos que generará en el desarrollo de proyectos marítimos. Junto con lo anterior, se revisará un proyecto nacional, evaluado según las metodologías propuestas con el fin de comparar los costos actuales con los asociados a la propuesta.

Se espera obtener una propuesta metodológica mejorada para estudios geotécnicos marítimos.

2. INFRAESTRUCTURA MARÍTIMA PORTUARIA

La infraestructura marítima se puede clasificar en función del objetivo para el cual serán utilizadas. Así estas estructuras se pueden separar en una amplia gama, dentro de las cuales, cada tipología de obra estará condicionada por una serie de esfuerzos a los cuales se verá sometida, además de las condiciones ambientales que influyen. Estas condiciones ambientales y esfuerzos dependerán del lugar en el cual se desarrolle el proyecto, ya que los vientos son diferentes, las profundidades del fondo marino, las corrientes, la sismicidad, entre otros aspectos y consideraciones (ROM 1.0-09, 2009).

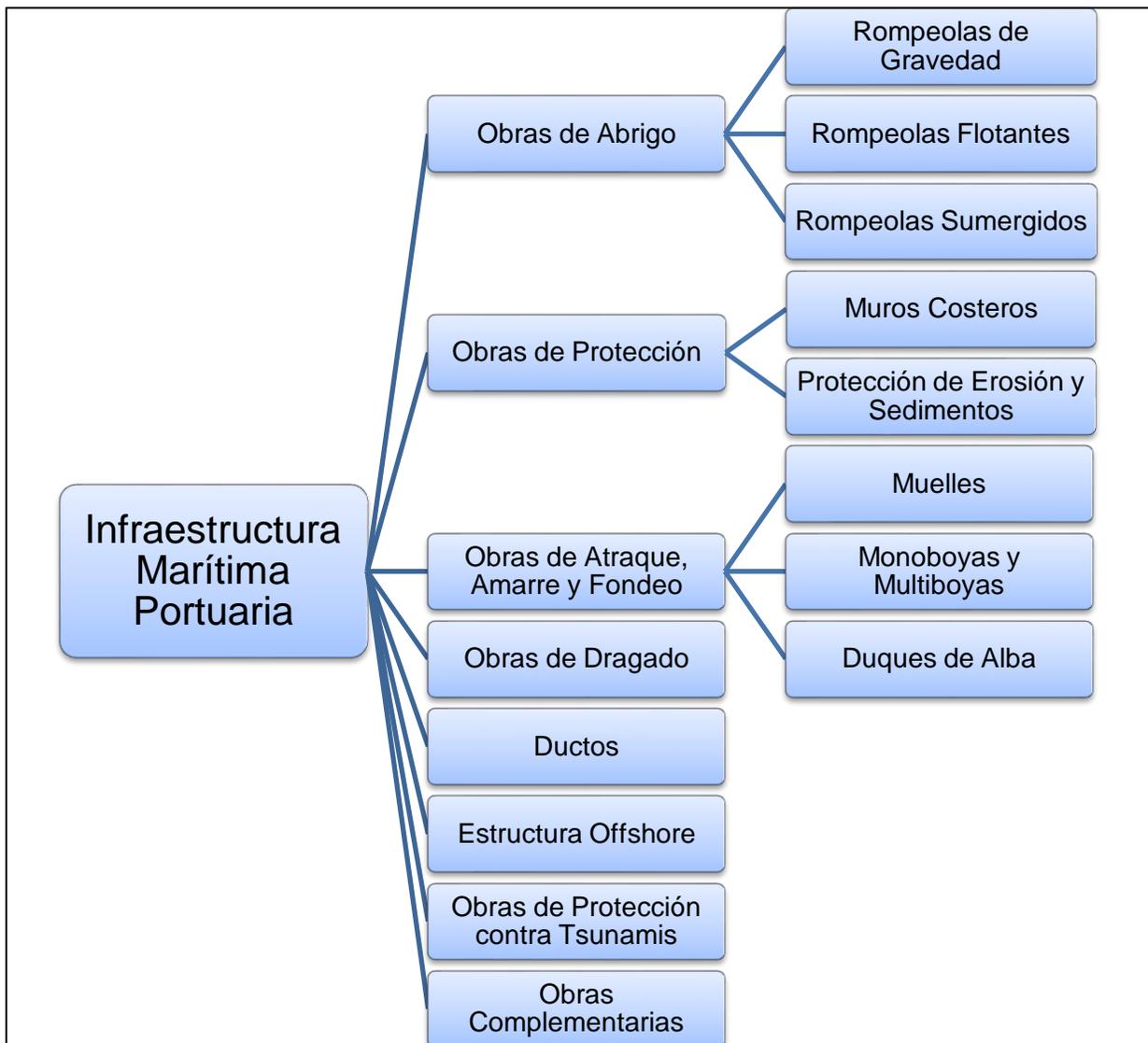


FIGURA 2. DIAGRAMA DE LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA (FUENTE: DOP, 2013).

2.1 OBRAS DE ABRIGO

Las obras de abrigo tienen como objetivo disminuir la energía del mar en ciertas zonas, generando zonas en las cuales se pueden maniobrar buques, zonas de acceso, entre otros. Entre las obras de abrigo se tienen varios tipos, siendo los principales, y más utilizados para obras portuarias en Chile los rompeolas de gravedad (Baesler, 2016), además se tienen los rompeolas exentos, flotantes, sumergidos y espigones.

2.1.1 ROMPEOLAS DE GRAVEDAD

2.1.1.1 Diques o Rompeolas en Talud o Escollera

Construidos con el empleo de elementos naturales o artificiales. Está formado por capas, comenzando por el núcleo, luego un filtro y finalmente un manto.

Para su construcción se requiere una etapa de mejoramiento de suelo, en caso de que el suelo original no tenga capacidad de sostener las cargas asociadas. Una vez colocado el nuevo material, y las capas propias del dique, se debe esperar un periodo, para que el suelo se consolide si se requiere construir una estructura sobre el rompeolas.

Los beneficios de un dique en talud por sobre otros, son principalmente que los materiales de construcción son más asequibles, y los daños que se generan por desgaste son progresivos, lo que permite distinguirlos con tiempo; por otro lado, la desventaja principal que presenta es que a grandes calados, el costo es muy elevado, además de su dificultad de construcción en zonas de grandes corrientes y/u oleajes (DOP, 2013).

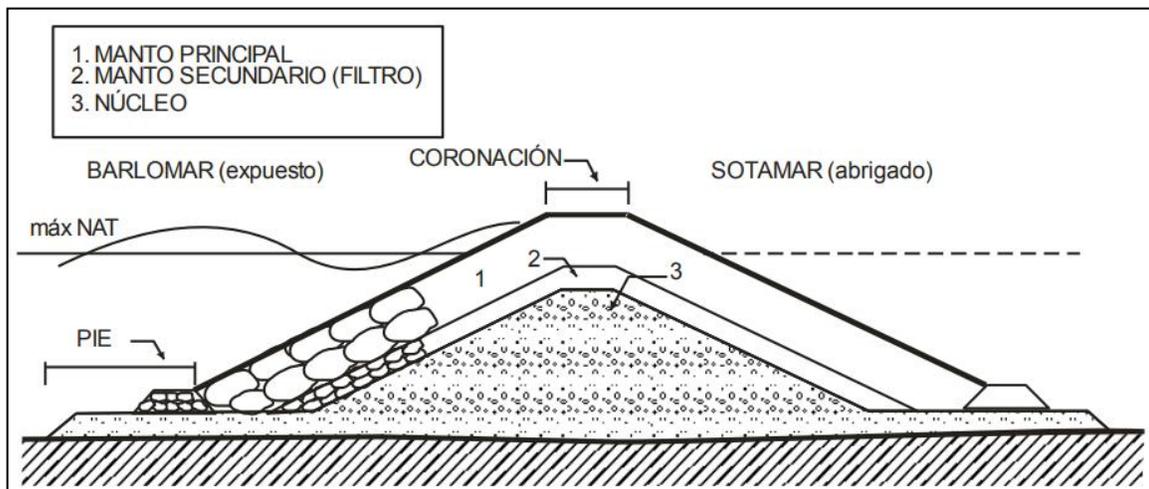


FIGURA 3. ESTRUCTURA DE UN ROMPEOLAS EN TALUD (ANTA, 2013)

2.1.1.2 Diques o Rompeolas Verticales

Sobre una cama de enrocado, se ubican los diques verticales, los cuales comúnmente están formados por cajones, bloques o pantallas (tablaestacas), rellenas de algún material. Frente a los esfuerzos propios del mar que recibe, su fuerza contrarrestante es únicamente su propio peso.

Se caracterizan por ser rápidos de construir, además de un buen comportamiento ante el oleaje durante su construcción. Debido a que este tipo de rompeolas utiliza una menor cantidad de material de cantera, suelen ser más económicos, además de permitir el atraque en el lado interior.

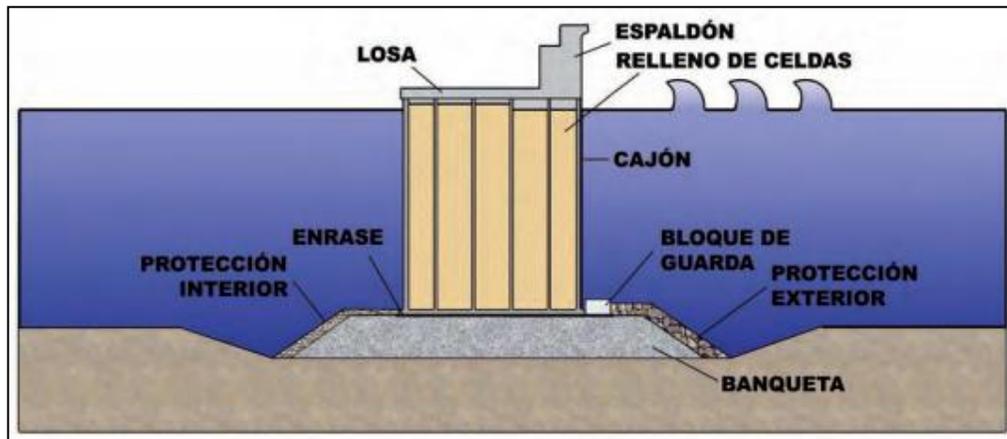


FIGURA 4. ESTRUCTURA DE UN DIQUE VERTICAL (FUENTE: GOBIERNO DE ESPAÑA, 2008).

2.1.1.3 Diques o Rompeolas Mixtos

Este tipo de rompeolas representan una mezcla de las dos tipologías anteriores. Consisten en una estructura vertical apilada en una escollera o directamente sobre el fondo marino.

2.1.2 ROMPEOLAS FLOTANTES

Comúnmente utilizados en zonas de deportes náuticos, consisten en obstáculos amarrados al fondo del mar y a veces, unidos entre sí.

Presentan una gran cantidad de ventajas, como presentar pocos requerimientos de cimentación y que pueden ser instalados, reparados o retirados fácilmente, pero por otro lado, no son efectivos para un funcionamiento por periodos extensos, además, debido al amarre que presentan con el fondo marino, requieren alto mantenimiento.



FIGURA 5. ROMPEOLAS FLOTANTE (FUENTE: DOP, 2013).

2.1.3 ROMPEOLAS SUMERGIDOS

Son rompeolas de tipo talud, que buscan disminuir la propagación de las olas, mediante una disminución de la altura de agua. Este tipo de rompeolas usa en general rocas de dimensiones similares para su construcción, y las consideraciones a tomar en su diseño son las mismas que para un rompeolas tipo talud.

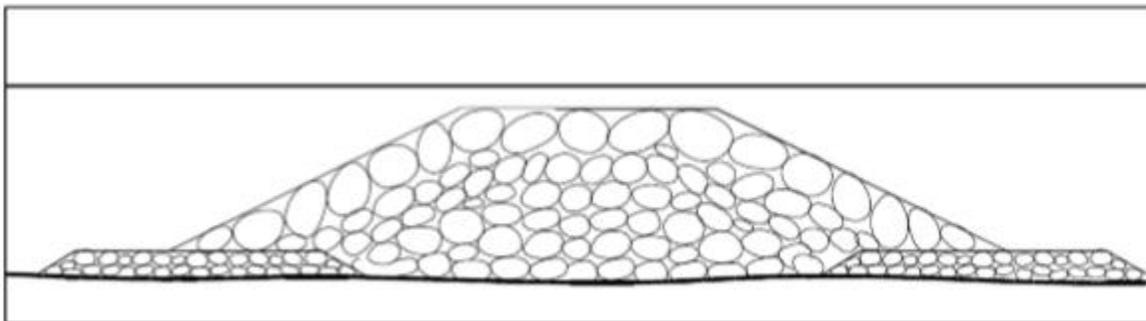


FIGURA 6. ESTRUCTURA DE ROMPEOLAS SUMERGIDO (FUENTE: DOP, 2013).

2.2 OBRAS DE PROTECCIÓN

Las obras de protección pretenden separar un área marítima de una terrestre, reteniendo el suelo, para evitar deslizamientos de tierra hacia el mar, y además proteger la tierra de erosiones por oleaje o corrientes. Se observan principalmente dos tipos, los muros costeros y las protecciones de erosión y sedimentos.

2.2.1 MUROS COSTEROS

Estos muros suelen situarse paralelos a la costa, buscando retener el suelo, evitar su erosión o deslizamientos, comúnmente se observan en muros costeros en talud o revestidos de hormigón, aunque también se pueden ver estructuras tipo pantalla (tablaestacas) o bloques de hormigón.



FIGURA 7. MURO COSTERO EN TALUD (FUENTE: DOP, 2013).

2.2.2 PROTECCIÓN DE EROSIÓN Y SEDIMENTOS

Las obras que retienen los sedimentos para que no lleguen a la playa son conocidas como rompeolas exentos, y consisten en una estructura discontinua. Este tipo de rompeolas se ubican relativamente paralelos a la costa, y sirven como trampa para sedimentos. Usualmente para ellos se han utilizado disposiciones tipo talud, pero también diseños tipo tablaestaca, cajones de hormigón entre otros.



FIGURA 8. ROMPEOLAS EXENTO EN BIBIONE ITALIA (FUENTE: GOOGLE EARTH).

Por otro lado se tienen las estructuras que protegen de la erosión, como los espigones, los cuales se ubican perpendicular a la costa, y busca retardar la erosión de una playa existente, o bien, que los sedimentos no alcancen ciertos sectores. Su diseño se desarrolla bajo los mismos criterios que un rompeolas tipo talud.



FIGURA 9. ESPIGONES EN COSTACABANA, ESPAÑA (FUENTE: GOOGLE EARTH).

2.3 OBRAS DE ATRAQUE, AMARRE Y FONDEO

Su finalidad es proporcionar condiciones para la estadía de un buque en un puerto, junto con permitir la carga y descarga de container, tránsito de pasajeros o vehículos. Según su tipología estructural se pueden clasificar en: Muelles, Duques de alba o Dolphin, Postes de amarre, Multiboyas y monoboyas, Soluciones mixtas, estaciones de transferencia a flote y Rampas. (DOP, 2013)

2.3.1 MUELLES

En Chile, los muelles se pueden clasificar en función de su impacto en la dinámica costera o bien, en función de su orientación (DOP, 2013), mientras que en otros países incluyen clasificaciones según el uso que tendrá el mismo (ROM 2.0-11, 2011). A continuación se presentan las definiciones según su clasificación.

2.3.1.1 Clasificación en función de su impacto en la dinámica costera.

2.3.1.1.1 Muelle Transparente

Este tipo de muelles están sobre una estructura de pilotes o pilas, lo que permite el flujo normal de agua bajo el mismo. En particular, los muelles transparentes que se sostienen sobre pilas, utilizan estructuras de gravedad, lo que requiere suelos de fundación con una alta capacidad, y fondos no muy profundos. Para la obtención de estas características se puede realizar un mejoramiento de suelo. Por otro lado, los muelles sostenidos sobre pilotes resultan una buena alternativa para suelos homogéneos sueltos, de naturaleza granular, como lo son las playas, pues permiten el traspaso de cargas hasta un estrato competente en el cual se alcanza el rechazo. (Fuente: Roig, 2013)



FIGURA 10. MUELLE VERGARA, VIÑA DEL MAR. EJEMPLO DE MUELLE TRANSPARENTE (FUENTE: ARCHIVOS PROPIOS).

2.3.1.1.2 Muelle Opaco

Los muelles opacos se caracterizan por estar sobre una estructura continua, que no permite el flujo normal del agua a través la estructura, a pesar de que en algunos casos se utilicen orificios para aumentar el flujo. Estos muelles pueden ser de dos tipos, muelles de gravedad, utilizados normalmente cuando el fondo marino es de alta calidad, o muelles de pantalla. Este último, requiere tirantes, pero se caracteriza por ser una opción más económica y que permite el avance más rápido de la obra.

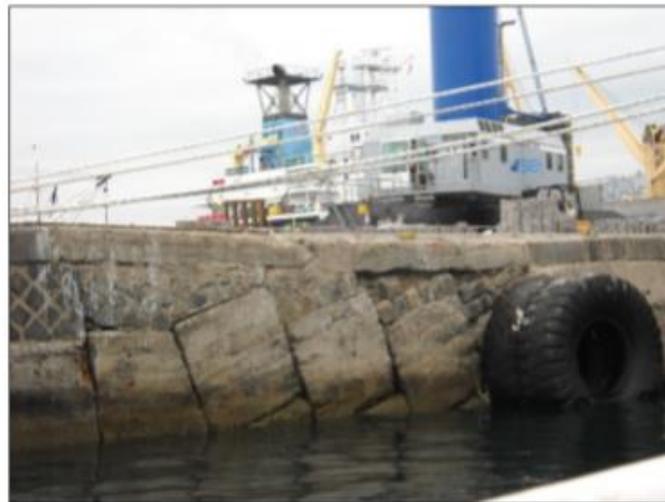


FIGURA 11. MUELLE OPACO (FUENTE: DOP, 2013).

2.3.1.2 Clasificación según su orientación

2.3.1.2.1 Muelle de Penetración

Un muelle de penetración se caracteriza por ser perpendicular, o con algún ángulo con respecto a la costa. Este tipo de muelles también son conocidos como pantalán o tipo espigón (DOP, 2013).



FIGURA 12. MUELLE DE PENETRACIÓN. PUERTO TOCOPILLA ELECTROANDINA. (FUENTE: DOP, 2005)

2.3.1.2.2 Muelle Marginal

Un muelle marginal es aquel que se ubica en paralela y adosada a la costa. También se les conoce como malecón.



FIGURA 13. MUELLE MARGINAL. EMPRESA PORTUARIA COQUIMBO (DOP, 2005).

2.3.2 MONOBOYAS Y MULTIBOYAS

Son estructuras que se anclan al fondo marino, permitiendo el amarre de embarcaciones en general. También se utilizan para carga de crudo en plataformas petrolíferas. La diferencia entre ambas está en que una monoboya permite el giro de la embarcación, mientras que las multiboyas limitan el movimiento. (Fuente: Almazán, Palomino y García, 2000).

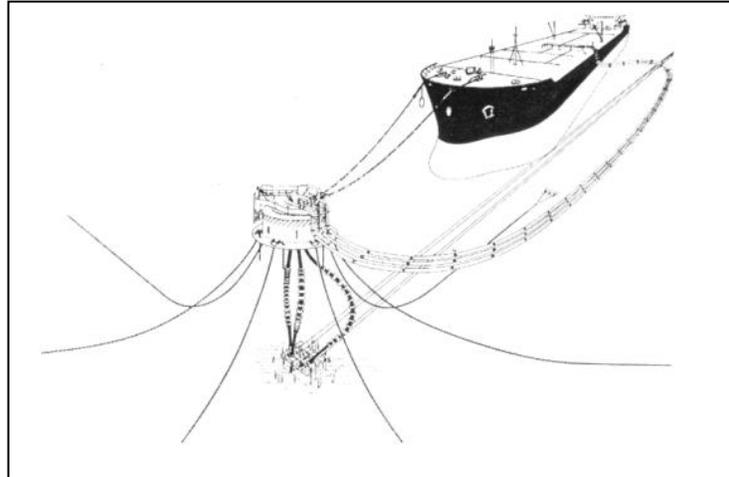


FIGURA 14. MONOBOYA CON BUQUE EN PROCESO DE CARGA PETROLÍFERA (FUENTE: ALMAZÁN, PALOMINO Y GARCÍA, 2000).

2.3.3 DUQUES DE ALBA

Según el “Glosario de la Infraestructura Costera y Portuaria” (DOP, 2014) los también conocidos como Dolphin son estructuras que se utilizan para el amarre de embarcaciones, de manera de facilitar las maniobras de atraque, resistiendo el impacto del buque y el tiro de amarras. Se pueden construir con un cajón de hormigón, generándose una estructura más flexible, o bien sobre pilotes, dando origen a una estructura más rígida.



FIGURA 15. DUQUE DE ALBA EN EL PUERTO PALMA DE MALLORCA, ESPAÑA (FUENTE: AUTORIDAD PORTUARIA DE BALEARES, [HTTP://WWW.PORTSDEBALEAR.S.COM/ES/](http://www.portsdebalears.com/es/) [CONSULTA 22-11-2017]).

2.4 OBRAS DE DRAGADO

Su objetivo es la extracción de materiales del fondo marino, lacustre o fluvial, para aumentar su profundidad. Pudiéndose realizar con fines de mantenimiento, de conservación o de construcción. El primero busca aumentar el calado de ciertas zonas de manera que se aumente la capacidad de transporte de agua, y el de construcción busca profundizar para facilitar la obra y para permitir el paso de buques sin que encallen.

2.5 DUCTOS

Buscan el transporte de fluidos desde o hacia el mar, o bien, son conductores destinados a servicios de telecomunicación. Los tipos de ductos son los siguientes: Ductos de Aducción, Emisarios, Tuberías de Transporte, Cables Submarinos (DOP, 2013).



FIGURA 16. DUCTO DE ADUCCIÓN (FUENTE: DOP, 2013).

2.6 ESTRUCTURAS OFFSHORE

El término de estructura offshore refiere a una construcción flotante o fijada en el fondo marino, las cuales deben resistir de buen modo, además del peso propio de la estructura, la fuerza de las olas y del viento. Las más comunes, son las plataformas petrolíferas o de extracción de gas.

Las estructuras fijas al lecho marino se encuentran las plataformas fijas, las cuales, en general, están conformadas por células de hormigón, mediante las cuales se controla la flotación de la estructura hasta su correcta colocación, y se comportan como un cuerpo rígido. Por otro lado, están las plataformas flexibles, que se desvían con el movimiento del mar, pero representa una estructura más económica que la anterior.

Por último, están las estructuras flotantes, entre las cuales se encuentran estructuras con las piernas tensadas al fondo marino, y las plataformas Spar, las cuales poseen un cilindro en su base, que no se extiende hasta el fondo pero ayuda a la estabilización de la misma.



FIGURA 17. PLATAFORMA JACK UP TIPO ASTRA (FUENTE: [HTTP://WWW.EURASIADRILLING.COM/OPERATIONS/OFFSHORE/JACK-UP-RIGS/](http://www.eurasiadrilling.com/operations/offshore/jack-up-rigs/) [CONSULTA 22-11-2017]).

2.7 OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA TSUNAMIS

Las obras de mitigación de tsunamis se dividen entre las estructuras naturales que sirven de protección, por ejemplo, playas, dunas o incluso zonas de forestación y las estructuras artificiales de diques de protección. Estas últimas se utilizan para puntos en específico debido a cómo afectan al paisaje. Entre estas últimas estructuras, se pueden encontrar rompeolas, muros, diques y compuertas.

2.8 OBRAS COMPLEMENTARIAS

Existen muchas otras obras, de menor envergadura, asociadas a la construcción de una obra portuaria, por ejemplo, pasarelas, torres de enfilación, escaleras de gato, chazas, bitas y defensas.

3. CONTEXTO NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA Y EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

3.1 TIPOS DE OBRAS EXISTENTES EN CHILE

La infraestructura marítima en el país cobra particular importancia pues “el 88% del comercio internacional de Chile se mueve por esta vía (CEPAL, 2003)” (MOP, 2005, p.1), es por esto, que el país cuenta con 24 puertos comerciales, que se extienden a lo largo del borde costero; estos poseen un calado que va desde los 8,75 y los 16,5 metros y eslora máxima de hasta 628 metros. Estos puertos representan las obras marítimas de mayor envergadura en el país. En la siguiente tabla, se pueden observar las características de cada uno.

**TABLA 1. DIMENSIONES MÁXIMAS PARA BUQUES PERMITIDAS EN PUERTOS A LARGO DEL PAÍS.
(FUENTE: MOP, 2005)**

	Puerto	Calado Máximo [m]	Eslora Máxima [m]
1	Arica	12,5	220
2	Iquique	11,3	245
3	Tocopilla	15	250
4	Angamos	12,8	225
5	Mejillones	16,5	230
6	Antofagasta	12	210
7	Caldera	11,8	165
8	Coquimbo	10	260
9	Ventanas	14,3	240
10	Oxiquim Quintero	12,2	280
11	Valparaíso	11,4	628
12	San Antonio	13	290
13	Lirquén	13,5	294
14	Penco	8,8	220
15	Oxiquim Escuadrón	12,2	211
16	CAP	11,2	200
17	San Vicente	12,2	200
18	Cabo Froward	12,5	250
19	Coronel	13	220
20	Corral	12,2	229
21	Puerto Montt	9,3	240
22	San José de Calbuco	11,5	230
23	Chacabuco	9,8	298
24	Punta Arenas	13,9	230

Además de las obras dedicadas al comercio exterior, existen una serie de caletas, dedicadas a la pesca artesanal. Según el Servicio Nacional de Pesca (SERNAPESCA), una embarcación artesanal tiene una eslora máxima de 18 metros, y no más de 80 metros cúbicos de capacidad en bodega, en base a lo anterior, se

puede decir que una embarcación pesquera artesanal tendrá como máximo un calado de 2,5 metros. Adicionalmente, el SERNAPESCA dispone de un registro de aproximadamente 60.000 pescadores/as artesanales a lo largo del país, por otra parte, el Ministerio de Defensa Nacional dispone de una nómina oficial de caletas de pescadores artesanales en Chile, según la cual existen 462 caletas. En la siguiente tabla, se detallan las caletas existentes por región:

TABLA 2. TABLA RESUMEN DE NÚMERO DE CALETAS ARTESANALES SEGÚN PROVINCIA EN CHILE. (FUENTE: DS 240, MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL, SUBSECRETARÍA MARINA, 2014).

Región	Número de Caletas
I Tarapacá	10
II Antofagasta	18
III Atacama	21
IV Coquimbo	33
V Valparaíso	32
VI Libertador Bernardo O'Higgins	5
VII Maule	13
VIII Bío-Bío	75
IX Araucanía	9
X Los Lagos	181
XI Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo	19
XII Magallanes y Antártica Chilena	11
XIV Los Ríos	33
XV Arica y Parinacota	2
Total	462

A pesar de que las caletas se encuentran registradas, el MOP (2009) afirma: “aún existen caletas pesqueras que no cuentan con infraestructura portuaria básica”, es decir, sitios de atraque, explanada de servicios, oficinas de administración entre otros, “y otras que requieren ampliaciones de lo existente o conservaciones de las obras, para mejorar la actividad pesquera artesanal” (MOP, 2009).

Otra infraestructura que se puede encontrar a lo largo del borde costero, es la dedicada a la acuicultura, la cual es principalmente privada, y dedicada a la salmonicultura, el desafío actual es proveer de infraestructura pública (MOP, 2009).

Los elementos que se encuentran en la industria acuícola son principalmente pontones flotantes, de hormigón armado, anclados al fondo marino y jaulas de crecimiento para salmónes también anclados al fondo. Las dimensiones de los pontones varían entre los 20 y 30 metros de largo por 12 a 15 metros de ancho, por lo que las barcas autorizadas llegar a ellos pueden tener dimensiones similares. Por otro lado, en cuanto a la profundidad del fondo marino, para el cultivo de salmónes se requieren profundidades cercanas a los 45 metros con el objetivo de no generar

contaminación remanente en la zona, por este motivo, los barcos que tienen acceso a los pontones no presentan limitaciones en esta dimensión (AQUA).



FIGURA 18. CENTRO DE CULTIVO DE SALMÓN EN LA REGIÓN DE AYSÉN. (FUENTE: [HTTP://WWW.AQUA.CL/2015/12/21/CAMANCHACA-INAUGURO-MODERNO-PONTON-QUE-DESALINIZA-AGUA-DE-MAR-PARA-SUS-PROCESOS/#](http://www.aqua.cl/2015/12/21/camanchaca-inauguro-moderno-ponton-que-desaliniza-agua-de-mar-para-sus-procesos/#))

Por otro lado, algunos de los puertos dedicados al transporte exterior cuentan con sitios dedicados al turismo de crucero, como por ejemplo, los puertos de Puerto Montt y Punta Arenas. En particular, en Puerto Montt se presentan limitaciones del tamaño de cruceros a recibir debido al Canal de Tenglo, esto requiere que los cruceros de mayor tamaño utilicen otras naves transbordadoras para que los pasajeros lleguen al terminal. Según la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) el terminal de transbordadores de Puerto Montt tiene una eslora máxima permitida de 133 metros, y un calado máximo permitido de 6,3 metros, el cual excepcionalmente se puede extender a los 6,8 metros en caso de contarse con la marea suficiente.

En el caso del Puerto Punta Arenas, se reciben pasajeros es los terminales de Puerto Natales, donde se permite una eslora máxima de 135 metros, y un calado máximo de 6,6 metros (DIRECTEMAR, 2015), y en el terminal Arturo Prat, donde la eslora máxima autorizada es de 176 metros, y el calado máximo de 9 metros (EPAUSTRAL).

Otros puertos que realizan transporte exterior pero que comparten los sitios de atraque de carga con los cruceros turísticos, son los puertos de Coquimbo y Valparaíso. Para el caso del puerto de Coquimbo cuenta con dos sitios de atraque, los cuales poseen un calado máximo entre 9,26 y 9,37 metros, y una eslora máxima de entre 180 y 185 metros (DIRECTEMAR, 2013). Por otro lado, el puerto de

Valparaíso cuenta dos terminales, las cuales en conjunto disponen de ocho sitios; ambas terminales corresponden a terminales de carga y pasajeros. La terminal 1, Terminal Pacífico Valparaíso (TPV), dispone de sitios de largos de entre 152,2 y 231,5 metros y calados máximos de entre 9,4 y 13,8 metros, mientras que la Terminal 2, Terminal Cerros de Valparaíso (TCVAL), dispone de sitios de largos entre 120 y 245 metros y calados máximos autorizados de entre 6,2 y 8,8 metros (www.puertovalparaiso.cl).

Desde la Región de los Ríos al sur, las obras que se observan están dedicadas principalmente a conectividad, conformada por rampas peatonales, vehiculares o de carga. En el 2007 los registros del MOP indican que 4,1 millones de personas y 958 mil vehículos utilizaron estos tipos de viaje y se proyecta que al 2020 esta cifra serán 6,3 millones de personas al año. En los últimos años el país ha realizado una inversión, buscando el aumento y mejora de la infraestructura de conectividad austral e insular.

Según los registros del MOP, los frentes de atraque y terminales de pasajeros de conectividad austral e insular se caracterizan por ser antiguos y no proveer servicios de refugio a los pasajeros. Por otro lado, las naves, en su mayoría, son antiguas y no acondicionadas, y no existe una garantía en cuanto a su frecuencia, tiempo de viaje ni tarifas máximas. Es por eso que dentro de lo proyectado al 2020 por el MOP se incluye una modernización de los transbordadores y contratos de servicios garantizados por medio de asociación público privada.

Debido a la ubicación de las obras de conectividad austral, estas en su mayoría se pueden considerar en zonas abrigadas, pues las mismas islas que conectan cumplen la labor de disminuir la energía del mar.

Por último, se observan las obras de tipo borde costero, que buscan generar un espacio para que la vida de la comunidad se desarrolle junto al mar. Algunos ejemplos de este tipo de obras con los miradores, paseos peatonales, zonas de descanso, entre otros.

3.2 MÉTODOS DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA EN CHILE

Como se vio en el Capítulo 1, en un proyecto durante su ingeniería básica se deben realizar los estudios geotécnicos pertinentes. A continuación se presentará explicación de los distintos tipos de exploración geotécnica utilizados en Chile.

En Chile, existe una única norma que habla de la exploración geotécnica como tal, la norma NCh 1508, pero ésta sólo abarca las obras de edificación y urbanización. Por otro lado, existen una serie de normas que hacen referencia a la metodología utilizada para ensayos de suelo y a la determinación de los coeficientes del mismo. Adicional a lo anterior, existen normas relacionadas con el diseño sísmico, en las cuales se hace referencia a la clasificación sísmica del suelo, estas normas son la NCh 433, dedicada al diseño sísmico de edificios y la NCh 2369, dedicada al diseño sísmico de estructuras industriales; en ambas, las obras marítimas están fuera del alcance.

Por otra parte, existe una guía desarrollada por la Dirección de Obras Portuarias, del Ministerio de Obras Públicas de Chile, denominada “Guía para el Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras”, en adelante Guía DOP, que presenta posibles ensayos y prospecciones mínimas a realizar para obras portuarias.

3.2.1 NORMA CHILENA NCH 1508: GEOTÉCNICA – ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS

Esta norma presenta “los requisitos mínimos que debe cumplir un estudio de mecánica de suelos para un proyecto u obra de edificación y urbanización.” (NCh 1508-2014), por este motivo, las obras marítimas no se encuentran cubiertas.

En dicha norma se define que el objetivo de un estudio de mecánica de suelos es determinar el comportamiento esperado del subsuelo frente a los esfuerzos generados por una obra, acción de agua y/o cargas dinámicas. Y se incluye la determinación de los parámetros del subsuelo de modo que el diseño de la obra se pueda desarrollar con un nivel de seguridad adecuado.

El estudio de mecánica de suelos se divide en 4 etapas:

- Trabajo de gabinete inicial
- Trabajo de campo
- Ensayos de laboratorio
- Informe de mecánica de suelos

A continuación se definirá cada etapa según la norma NCh 1508.

3.2.1.1 TRABAJO DE GABINETE INICIAL

El trabajo de gabinete inicial consiste en recopilar la información existente de la zona, incluyendo ubicación, información geológica, información geotécnica e información local (orientado a las obras existentes en el área).

Adicional a la recopilación de información, se debe planificar el trabajo a realizar, considerando las técnicas de reconocimiento, el número de puntos a explorar, la profundidad de exploración, el muestreo y los ensayos a efectuar en el sitio y por último, el tipo y la cantidad de ensayos a realizar en laboratorio.

3.2.1.2 TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo puede incluir tres tipos de exploración diferentes:

- La exploración del subsuelo, referida la exploración directa del subsuelo mediante calicatas, pozos, zanjas o sondajes.
- Ensayos y mediciones en sitio, referida a ensayos y mediciones que se realizan en la superficie del terreno o bien en el interior de
- Prospecciones geofísicas.

3.2.1.2.1 Exploración del Subsuelo

La exploración del subsuelo se refiere principalmente a los métodos de exploración directa, mediante los cuales se pueden obtener muestras para ensayar posteriormente en laboratorio. Los métodos de exploración del subsuelo mencionados en la norma NCh 1508 son los siguientes:

- **Calicatas, pozos o zanjas**

Están destinadas a prospecciones terrestres. Deben extenderse hasta la roca o suelo duro, pero para fundaciones directas, la profundidad de la exploración deberá extenderse lo indicado en el Anexo A de la Norma NCh 1508, es decir, se tienen dos casos: fundaciones superficiales o profundas.

Para fundaciones superficiales la profundidad mínima de exploración se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Z_p \geq D_f + z$$

Donde:

D_f = distancia vertical desde la superficie del terreno al sello de fundación
 $z = 1,5 B$; con B el lado menor de la fundación.

Para fundaciones profundas, la profundidad de exploración se tiene a partir de lo siguiente:

$$Z_p \geq D_f + D_E$$

Donde:

D_f = distancia vertical desde la superficie del terreno al extremo inferior de la fundación.
 D_E = varía según el tipo de fundación y el área que cubre la edificación.



FIGURA 19. ZANJA DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA (FUENTE: DAY, 2006).

- **Sondajes**

Los sondajes mecánicos se deberán realizar hasta alcanzar la roca, o bien, hasta un suelo duro, es decir, que al golpearlos con la cuchara normalizada del ensayo SPT, posean un índice de penetración normalizado por profundidad $N_1=50$ golpes/pie como mínimo (este ensayo se explicará más adelante en detalle). En caso de encontrarse con roca, el sondaje se deberá extender 3 metros bajo roca, y para suelo duro 7 metros (DOP, 2013).

La penetración del sondaje no se define, pero según el Manual de Carreteras de Chile (MOP, 2017), un sondaje se realiza con el fin de reconocer una profundidad que supera los 6 metros.

Si la exploración se está realizando para estructuras profundas, tales como pilotes o pilas de fundación, la exploración deberá extenderse de la siguiente manera (DOP, 2013):

- Para punta de los pilotes o bajo sellos de fundación de las pilas, 7 metros o bien 3 veces el diámetro de la punta del pilote
- Para el caso contrario, 3 veces el lado menor de la fundación de la pila.

En cuanto a los métodos utilizados en la perforación, pueden ser por percusión, rotoperusión, lanza de agua, rotación o con posteadores manuales, pero el uso de los 3 primeros genera alteración en el suelo, por lo tanto, si se pretende muestrear no son recomendables.

Si se quieren efectuar ensayos in-situ en el interior del sondaje la metodología puede variar, por ejemplo, para la obtención de muestras poco perturbadas se utilizan muestreadores de doble o triple tubo (tipo HQ3), para esto se requiere perforar mediante rotación y para ensayos de permeabilidad el diámetro del sondaje debe ser mayor, por lo que se opta por métodos de percusión (MOP, 2017).

Por último, como resultado de dicha prospección, según indica la Guía DOP, se deben obtener una serie de datos, los cuales se detallan a continuación.

- Coordenadas y cota de boca de prospección.
- Tipo de herramienta empleada en el avance y en la obtención de muestras
- Índice de penetración estándar, normalmente cada 1,5 metros.
- Estratigrafía detallada, y posición del nivel freático, cuidando que no esté distorsionado por agua de inyección
- Ubicación de las muestras alteradas e inalteradas
- Grado de alteración, fracturación, dureza y RQD de la roca.



FIGURA 20. SONDAJE GEOTÉCNICO. (FUENTE: LEMCO, LABORATORIO DE ENSAYE DE MATERIALES Y CONTROL DE OBRAS, 2018)

3.2.1.2.2 Ensayos y mediciones en sitio

Los ensayos o mediciones en sitio corresponden a los realizados en la superficie del terreno o bien, en el interior de las prospecciones realizadas para su exploración.

La norma NCh 1508 no indica ni recomienda que ensayos geotécnicos in-situ utilizar para cada situación.

3.2.1.2.3 Prospecciones Geofísicas

Las prospecciones geofísicas tienen como objetivo la exploración del subsuelo mediante técnicas no destructivas. Según dicta la norma Chilena hay 3 métodos que son más comunes:

- **Refracción sísmica:**

La refracción sísmica es un sistema aplicado para el reconocimiento de zonas marítimas o terrestres, considerado un antecedente complementario (DOP, 2013). Requiere que la rigidez de los estratos vaya aumentando junto con la profundidad. Cuando se realiza en tierra mide ondas de compresión (V_p) y de corte (V_s), y se realiza generando un impacto en un extremo de la línea prospectada, la cual lleva geófonos a lo largo de ella. Para el caso marino, el ensayo sólo mide ondas de compresión en la estratigrafía, pues el agua no transmite las ondas de corte, y se realiza mediante un cañón de aire comprimido o una señal eléctrica que genera perturbación en el agua, y mediante una embarcación, que arrastra una línea de geófonos semisumergidos se realiza la medición.

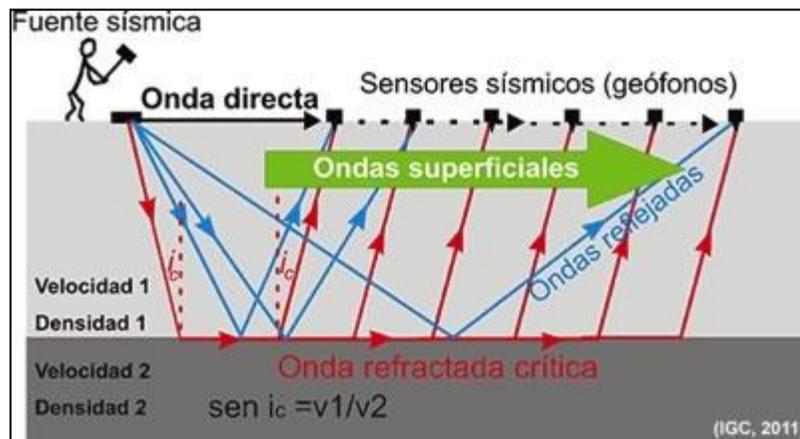


FIGURA 21. ESQUEMA DE ENSAYO SÍSMICO. SE PUEDEN APRECIAR LAS ONDAS DIRECTAS (SUPERFICIALES), LAS ONDAS REFLEJADAS, Y LAS REFRACTADAS, ESTAS ÚLTIMAS CORRESPONDEN A LAS MEDIDAS DURANTE EL ENSAYO (FUENTE: [HTTP://WWW.GEOARSRL.COM/TOMOGRFIA-SISMICA-DE-REFRACCION/](http://www.geoarsrl.com/tomografia-sismica-de-refraccion/) [CONSULTA 10-01-2018]).

- **Medición de ondas Rayleigh**

A partir de la dispersión de las ondas superficiales Rayleigh, y sus diferentes frecuencias y velocidades en medios estratificados, nacen los métodos SASW, MASW y REMI, que se basan en la medición de los mismos. Según el OCSA (OCSA, 2016) estos métodos se pueden describir de la siguiente manera:

SASW:

Este método se basa en el análisis espectral de las ondas, se miden las velocidades de fase para diferentes longitudes de onda. Los espectros se calculan en tiempo real mediante una transformada rápida de Fourier.

MASW:

Como su nombre lo indica, consiste en un análisis multicanal. Estima la variación de la velocidad de propagación de las ondas superficiales desde la fuente emisora hasta los geófonos receptores.

REMI:

Método que se utiliza en tierra, y utiliza el ruido ambiental permite determinar las velocidades de compresión y de corte de los estratos, permitiendo analizar líneas de prospección

- Medición directa de velocidad de ondas de corte

Según la norma, esta descripción hace referencia principalmente a prospecciones del tipo Down-Hole y Cross-Hole, los cuales se explican a continuación:

Cross-Hole:

Este método requiere un mínimo de dos perforaciones paralelas, hasta la misma profundidad, en una de las perforaciones se emite una señal que es recibida en el otro con un geófono. Obteniéndose las velocidades de onda de corte y de compresión que viajan en forma paralela al terreno natural o el fondo marino. Si bien este método se puede utilizar en zonas marítimas y terrestres, su uso en medios marinos se ha ido perdiendo debido a la necesidad de utilizar dos perforaciones (DOP, 2013).

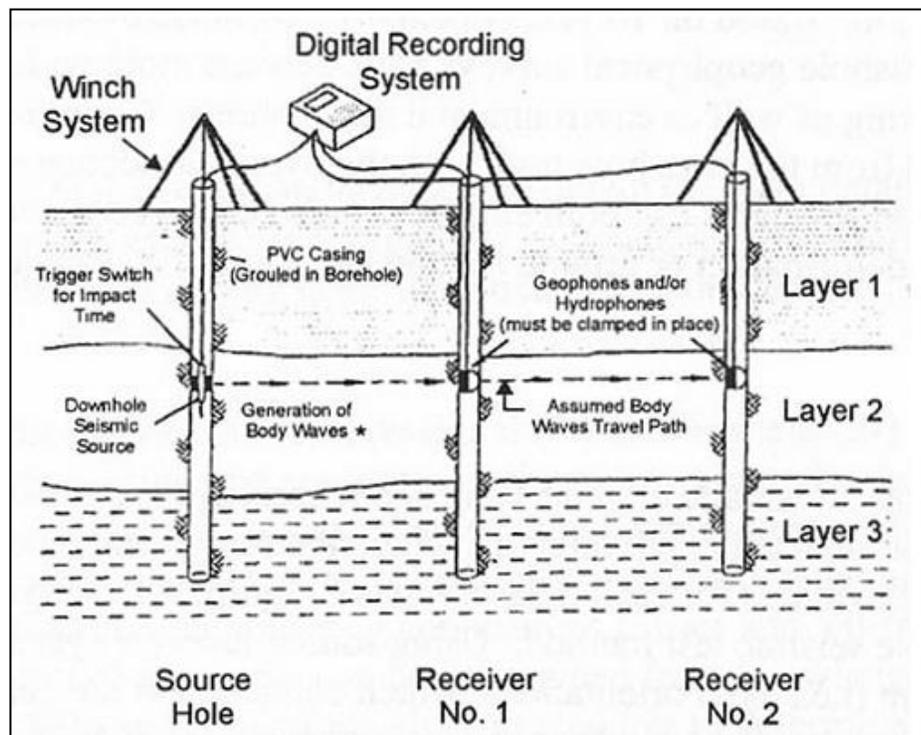


FIGURA 22. ESQUEMA DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE CROSSHOLE. SE PUEDEN OBSERVAR 3 PERFORACIONES, UNA CON UNA FUENTE Y 2 CON RECEPTORES DE ONDAS. (FUENTE: GEOMETRICS. INNOVATION, EXPERIENCE, RESULTS; 2017).

Down-Hole

Este método cuando se usa en mar o en tierra, cuando se usa en mar consiste en generar ondas mediante un pulso eléctrico, y luego, con un geófono que circula dentro del sondaje, medir los distintos tiempos de arribo de la onda de corte en forma descendente. De este modo se obtienen las velocidades de compresión y de corte para las distintas profundidades. Es importante notar que el sondaje debe estar previamente revestido con un tubo de PVC convenientemente unido con las paredes de la perforación mediante una inyección de lechada. En tierra el mecanismo es similar, con la diferencia de que las ondas se generan mediante golpes verticales y horizontales en una placa.

El objetivo de este ensayo es encontrar los módulos elásticos dinámicos del terreno, como son el coeficiente de Poisson, el módulo de rigidez, de Young, o de compresión.

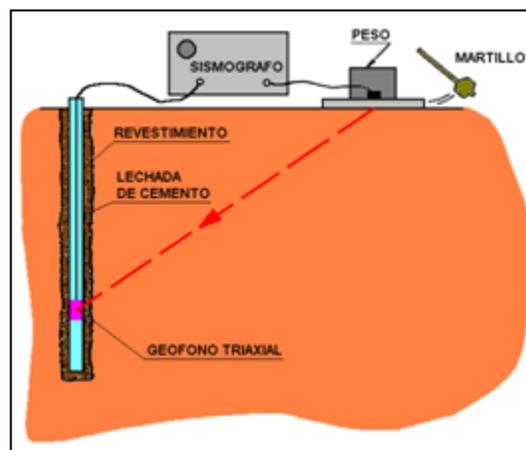


FIGURA 23. ESQUEMA DE ENSAYO DOWNHOLE (FUENTE: [HTTPS://BASALTOIT.COM/DOWN-HOLE](https://basaltoit.com/down-hole) [CONSULTA 10-01-2018]).

3.2.1.3 ENSAYOS DE LABORATORIO

Si bien en la norma se deja claro la posibilidad de incluir nuevos ensayos sugeridos por un profesional competente, y se incluye un listado de posibles ensayos a realizar, se señalan algunos ensayos y mediciones mínimas, los cuales no deben ser necesariamente realizados en todas las muestras:

- Clasificación completa, considerando granulometría, límites de Atterberg y clasificación USCS o AASCHTO
- Peso específico
- Contenido orgánico cuando corresponda
- Densidad in-situ o peso unitario natural
- Contenido de humedad natural

Adicionalmente a lo anterior, se dictan ciertas características que se deben determinar en función del tipo de suelo:

- Arenas: Compacidad y/o resistencia al corte
- Suelos finos: Consolidación, resistencia al corte, hinchamiento libre y presión de hinchamiento.
- Suelos singulares: para este caso particular, un profesional competente debe definir los ensayos. Entre los suelos singulares se podrían encontrar
 - Arenas licuables
 - Limos colapsables
 - Suelos expansivos
 - Entre otros.

3.2.1.4 INFORME DE MECÁNICA DE SUELOS

Al reunir la información obtenida del trabajo de gabinete, de lo realizado en terreno y de los ensayos de laboratorio, el profesional competente debe determinar las propiedades geotécnicas del suelo. Según dicta la norma, un informe de mecánica de suelos como mínimo debe incluir:

- Alcance: La validez técnica del informe.
- Descripción general del proyecto para el cual se realiza el estudio
- Objetivo del informe: Se debe indicar la finalidad del estudio
- Antecedentes utilizados
- Trabajo de campo realizado: Puntos de exploración, profundidad, fecha de ejecución y plano con la ubicación.
- Trabajos de laboratorio realizados
- Descripción geológica, si se considera necesario
- Descripción geotécnica del subsuelo: Definiendo claramente la estratigrafía y las características de cada estrato. Se debe incluir la profundidad de la napa y la fecha de control.
- Parámetros de diseño obtenidos del trabajo de campo y de laboratorio.
- Clasificación sísmica según norma sísmica vigente
- Recomendaciones de diseño, indicando los criterios utilizados.
- Condiciones para la ejecución de obras: Excavaciones, mejoramientos de suelos, compactaciones cortas, terraplenes, procedimientos de control, etc.
- Recepción de sellos de las fundaciones de la obra.

3.2.2 NORMA CHILENA NCH 2369: DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS E INSTALACIONES INDUSTRIALES

La última versión de esta norma fue oficializada en el año 2003, pero hace algunos años, se comenzó una actualización de la misma, la cual se encuentra en etapa de consulta pública. El presente trabajo de título se centra en el borrador abierto a la consulta pública.

Esta norma, se enfoca en el diseño sísmico de estructuras industriales, y posee un capítulo dedicado a estructuras marítimo-portuarias del tipo muelle transparente, entregando una razón de amortiguamiento y un factor de modificación de la respuesta estructural para ciertas distribuciones de pilotes en la estructura.

Adicionalmente, la norma entrega una clasificación sísmica del suelo, la cual cobra particular importancia en un estudio geotécnico, pues como se vio en la sección 3.2.1., la norma NCh 1508 lo solicita. A continuación se presenta la clasificación sísmica del suelo:

TABLA 3. DEFINICIÓN DE LOS TIPOS DE SUELO DE FUNDACIÓN (FUENTE: VERSIÓN EN CONSULTA PÚBLICA DE NORMA NCH 2369, 2018).

Tipo de suelo	Descripción
I	Roca: Material natural, con velocidad de propagación de ondas de corte in-situ v_s igual o mayor que 900 m/s, o bien, resistencia de la compresión uniaxial de probetas intactas (sin fisuras) igual o mayor que 10 MPa y RQD igual o mayor que 50%.
II	<p>a) Suelo con v_s igual o mayor que 400 m/s en los 10 m superiores, y creciente con la profundidad; o bien,</p> <p>b) Grava densa, con peso unitario seco γ_d igual o mayor que 20 kN/m³, o índice de densidad ID(DR) (densidad relativa) igual o mayor que 75%, o grado de compactación mayor que 95% del valor Proctor Modificado; o bien,</p> <p>c) Arena densa, con ID(DR) mayor que 75%, o Índice de Penetración Estándar N mayor que 40 (normalizado a la presión efectiva de sobrecarga de 0,10 MPa), o grado de compactación superior al 95% del valor Proctor Modificado; o bien,</p> <p>d) Suelo cohesivo duro, con resistencia al corte drenado S_u igual o mayor que 0,10 Pa (resistencia a la compresión simple q_u igual o mayor que 0,20 MPa) en probetas sin fisuras.</p> <p>En todos los casos, las condiciones indicadas deberán cumplirse independientemente de la posición del nivel freático y el espesor mínimo del estrato debe ser 20 m. Si el espesor sobre la roca es menor que 20 m, el suelo se clasificará como tipo I.</p>
III	<p>a) Arena permanentemente no saturada, con ID(DR) entre 55 y 75%, o N mayor que 20 (sin normalizar a la presión efectiva de sobrecarga de 0,10 MPa); o bien,</p> <p>b) Grava o arena no saturada, con grado de compactación menor que el 95% del valor Proctor Modificado; o bien,</p> <p>c) Suelo cohesivo con S_u comprendido entre 0,025 y 0,10 MPa (q_u entre 0,05 y 0,20 MPa) independientemente del nivel freático; o bien,</p> <p>d) Arena saturada con N comprendido entre 20 y 40 (normalizado a la presión efectiva de sobrecarga de 0,10 MPa).</p> <p>Espesor mínimo del estrato: 10 m. Si el espesor del estrato sobre la roca o sobre suelo correspondiente al tipo II es menor que 10 m, el suelo se clasificará como tipo II.</p>
IV	<p>Suelo cohesivo saturado con S_u igual o menor que 0,025 MPa (q_u igual o menor que 0,050 MPa).</p> <p>Espesor mínimo del estrato: 10 m. Si el espesor del estrato sobre suelo correspondiente a algunos de los tipos I, II o III es menor que 10 m, el suelo se clasificará como tipo III.</p>

3.2.3 GUÍA DOP

La Guía DOP corresponde a una búsqueda por “generar un estándar nacional... y reúne normas y recomendaciones que mejor se ajusten a las condiciones propias de nuestro país”. El alcance de la misma es toda obra marítima, costera y lacustre que se desarrolle en el territorio nacional.

El documento, contiene un capítulo especialmente dedicado a estudios geotécnicos, y otro dedicado a estudios básicos, donde también se incluyen algunas técnicas geofísicas, pero que no se recomiendan orientadas a la geotecnia.

El capítulo enfocado a la geotecnia, se puede dividir ampliamente en: métodos de exploración directa, reconocimiento geofísico, ensayos in-situ y ensayos de laboratorio.

3.2.3.1 EXPLORACIÓN DIRECTA

A continuación se detallan los métodos de exploración directa mencionados en la Guía DOP:

3.2.3.1.1 Sondajes Mecánicos

Según fueron descritos en la sección 3.2.1.2.1.

3.2.3.1.2 Zanjas y Calicatas

Según fueron descritos en la sección 3.2.1.2.1.

3.2.3.1.3 Lanza de Agua

Si bien esta metodología no se menciona en el capítulo de estudios geotécnicos de la guía, si no en la de topografía y estudios oceánicos, en particular en los estudios de calidad de fondo.

Mediante esta metodología, se busca conocer el espesor de sedimento en el fondo marino, esto se realiza con un buzo que baja a las profundidades, y con un elemento metálico provisto de un chorro de agua penetra en el fondo hasta conseguir un rechazo. Luego se mide la penetración del mismo

3.2.3.1.4 Inspección Visual Submarina

Estas inspecciones se realizan por un contratista de buceo, que cumpla las “normativas de seguridad emitidas por la autoridad marítima para este tipo de trabajos” (DOP, 2013). El objetivo será la obtención de un registro filmográfico de las tareas realizadas.

3.2.3.2 RECONOCIMIENTO GEOFÍSICO

En cuanto al estudio del suelo mediante métodos geofísicos, la Guía DOP recomienda 5 métodos, los cuales se detallan a continuación.

3.2.3.2.1 Refracción Sísmica

Según fue descrita en la sección 3.2.1.2.3

3.2.3.2.2 PS Logging

También llamada sonda de suspensión acústica, es un método que sirve para explorar en zonas terrestres y marítimas, para utilizarlo, se requiere un sondaje previamente revestido, en el cual se introduce un torpedo, que tiene una fuente generadora de ondas de compresión y corte en un extremo, y en el otro extremo un transductor que las recibe.

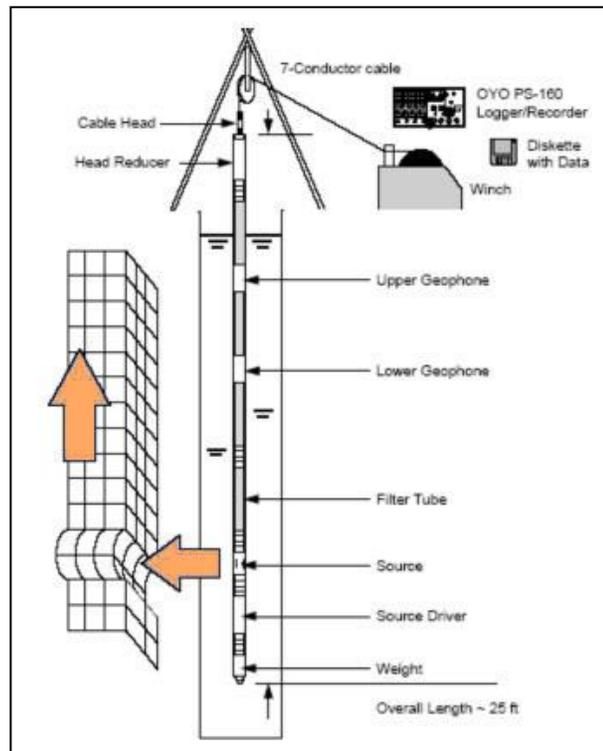


FIGURA 24. MODELO EXPLICATIVO DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE EL MÉTODO PS LOGGING. (FUENTE: IGEOTEST. GEOSCIENCE GROUP, 2016)

3.2.3.2.3 Cross-Hole

Según fue descrito en la sección 3.2.1.2.3.

3.2.3.2.4 Down-Hole

Según fue descrito en la sección 3.2.1.2.3.

3.2.3.2.5 ReMi

Según fue descrito en la sección 3.2.1.2.3.

3.2.3.3 ENSAYOS IN SITU

Los ensayos In Situ buscan caracterizar las propiedades geotécnicas del suelo, ensayando en terreno, en el mismo lugar donde se encuentra el estudio, sin necesidad de extraer una muestra y movilizarla.

3.2.3.3.1 Ensayos de Placa de Carga Dinámica

Según la Guía DOP, este ensayo consiste en colocar una placa sobre el terreno natural, aplicarle distintas cargas y medir sus deformaciones. Algunos de los datos que se pretenden obtener son los siguientes:

- Capacidad de carga del suelo para un asentamiento determinado.
- Coeficiente de Balasto (K)
- Curva de carga contra deformación del suelo.
- Coeficiente de elasticidad del suelo (E)
- Estabilidad de pavimentos o bases de camino ya existentes.



FIGURA 25. HERRAMIENTA UTILIZADA PARA ENSAYO DE PLACA DE CARGA, EN SU VERSIÓN DINÁMICA. (FUENTE: TERRATEST).

3.2.3.3.2 Ensayos de Permeabilidad

Estos ensayos buscan establecer el coeficiente de permeabilidad del suelo (k), pueden ser aplicados en calicatas o en sondajes. En calicatas se utilizan ensayos del tipo agotamiento o recuperación, o de infiltración, mientras que en sondajes se utilizan los ensayos Lefranc para definir el coeficiente en suelo y Lugeon para definir el coeficiente en roca (DOP, 2013).

El coeficiente de permeabilidad también se puede obtener mediante ensayos en laboratorio, permitiendo el paso de un flujo de agua por una muestra de suelo.

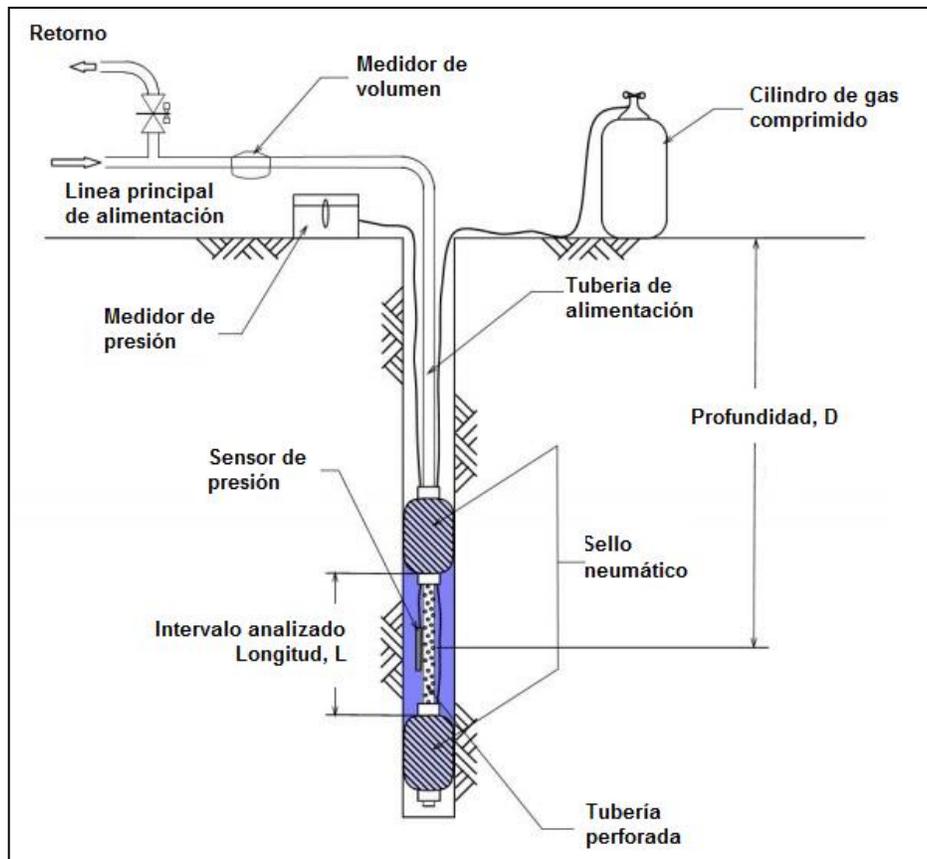


FIGURA 26. ESQUEMA DE ENSAYO LUGEON (FUENTE: [HTTP://WWW.GEOTECHDATA.INFO/GEOTEST/LUGEON_TEST.HTML](http://www.geotechdata.info/geotest/lugeon_test.html) [CONSULTA 10-01-2018])

3.2.3.3.3 Ensayos de Penetración

El ensayo de penetración que se utiliza típicamente es el SPT, o ensayo de penetración estándar (Standard Penetration Test). Este ensayo se encuentra descrito por la norma ASTM D1586 y es una prueba de penetración dinámica, que se realiza en el fondo de sondajes o directamente en el suelo (en mar o en tierra). Consiste en un martillo que golpea una cuchara estandarizada, contando el número de golpes ejecutados para introducirla hasta cierta profundidad, además, permite la obtención de una muestra alterada, la cual puede ser utilizada para determinar el contenido de humedad y para identificar y clasificar el suelo.

Para la realización del ensayo se efectúan tres marcas en las varillas de perforación, separadas por 0,15 metros, las que permitirán observar el avance de la penetración. Según la norma ASTM D1586, se introduce la cuchara y se golpea con el martillo, contando el número de golpes hasta que se cumpla una de las siguientes condiciones:

- i. Se aplicaron 50 golpes durante uno de los tres tramos de 0,15 metros.
- ii. Se aplicaron un total de 100 golpes.
- iii. Luego de 10 golpes consecutivos, no se observa avance de la cuchara de muestreo.
- iv. Se avanzaron los 0,45 metros completos sin incurrir en alguno de los límites descritos anteriormente.

Como resultado del ensayo se obtendrán 3 valores de número de golpes (N), uno para cada de los tramos de 0,15 metros, o para sus fracciones, es decir, se obtienen resultados discretos. El valor de N para el primer tramo es considerado un valor de adaptación, y la suma de los dos siguientes tramos es llamada “Resistencia estándar de penetración”, o simplemente “N-value” (ASTM D1586, 2011).

El ensayo tiene ciertas limitantes, para arenas su funcionamiento es óptimo, pues existen correlaciones entre los resultados del ensayo y la densidad relativa, el ángulo de fricción y el potencial de licuación, pero para suelos finos, no existen estas correlaciones pues se tiene mucha dispersión, es por esto que los resultados deben usarse con cautela (DOP, 2013).

Las muestras que quedan al interior de la cuchara normalizada del SPT, son las que se someten a posteriores ensayos de laboratorio, estas muestras suelen ser muy alteradas, es decir, sólo conservan algunas propiedades del terreno natural. Esta recuperación solo es posible en suelos cohesivos no muy firmes y suelos granulares sin gravas no muy densas y con algunos finos.

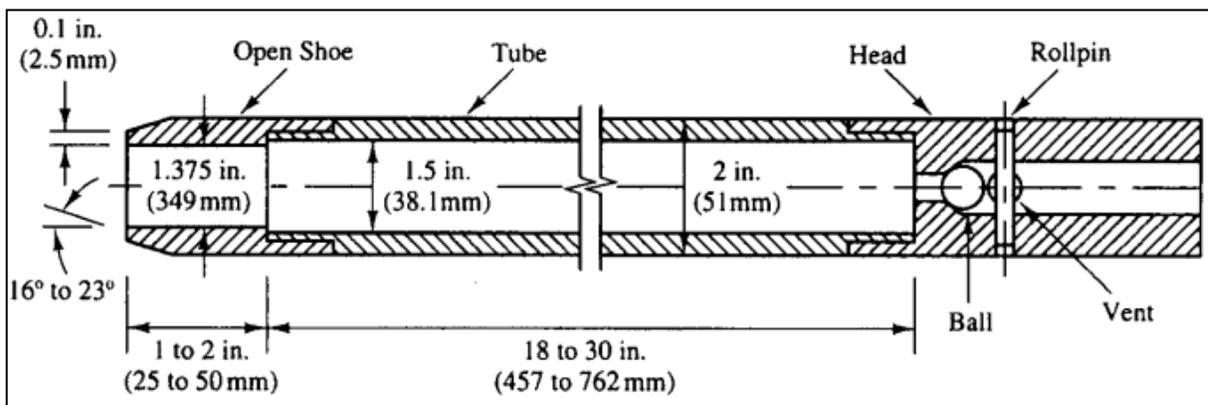


FIGURA 27. DIMENSIONES DE LA CUCHARA NORMALIZADA SPT (FUENTE: ASTM D1586, 2011).

3.2.3.3.4 Ensayo de Cono Dinámico o Penetrómetro Dinámico

Este ensayo consiste en un penetrómetro con una punta en forma de cono, sobre la cual se deja caer una masa con un peso definido obteniéndose como resultado el número de golpes necesario para que el penetrómetro se hinque. Corresponde a un ensayo que no requiere perforación previa.

Según la magnitud de la masa utilizada, el ensayo puede ser aplicado de forma manual o mecánica (ROM 0.5-04, 2005).

Si bien existen una amplia variedad de versiones, en las cuales varía el ángulo y diámetro del cono, además de la masa con la que se golpea el cono para hincar, en la Guía DOP se hace referencia a la versión que posee un ángulo de 60° en la punta y un diámetro de 50 mm, denominada puntaza. Este ensayo está recomendado especialmente para establecer el espesor de suelos blandos.

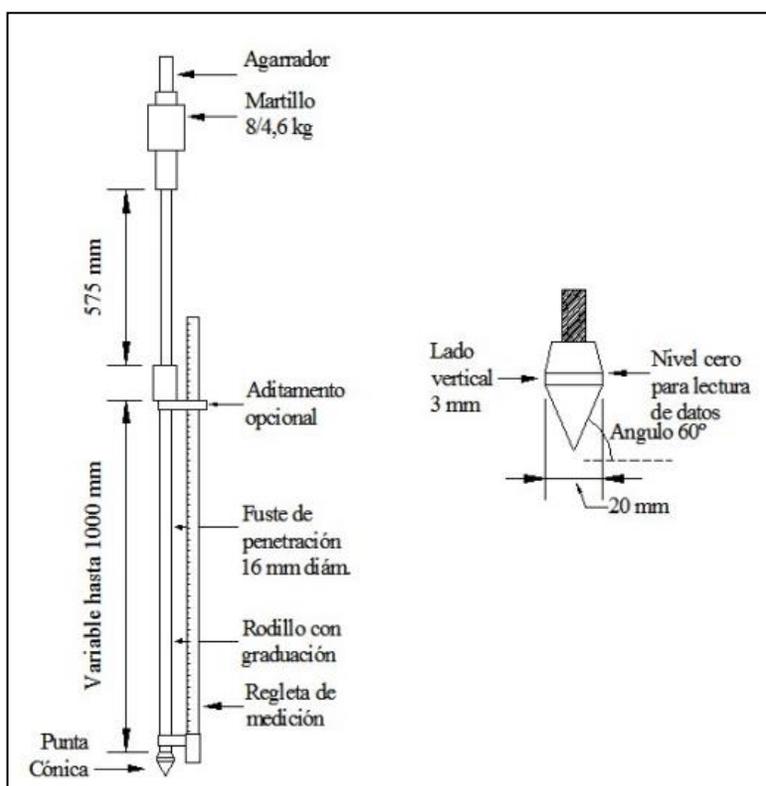


FIGURA 28. ESQUEMA DEL EQUIPO SEGÚN NORMA ASTM (FUENTE: ASTM D6951, 2003)

3.2.3.3.5 Ensayo de Penetrómetro Estático (CPT)

En la Guía se hace referencia al ensayo en su versión más común, regulado por la norma ASTM D5778 (*Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*), el cual, mediante una gata hidráulica, hinca un cono. Como resultados del ensayo se obtienen datos de inclinación, fricción de la manga y resistencia del cono.

En base a estos datos obtenidos, se pueden derivar la estratigrafía, coeficiente de fricción y cohesión del suelo, resistencia no drenada y el potencial de licuefacción

del suelo. Este ensayo puede ser utilizado para estudiar suelos finos o arenas, pero no se puede realizar en suelos que presenten gravas.

Este ensayo se puede efectuar en tierra o en mar. Según conversaciones con contratistas del ámbito, cuando se aplica en mar, el ensayo debe ser efectuado desde una plataforma elevable, que ejerza la resistencia necesaria frente a la máquina que efectúa la penetración.

En la Figura 29, se puede observar el cono utilizado para este ensayo, junto con sus dimensiones típicas. La principal ventaja de este ensayo es que se caracteriza por ser continuo y sus datos son repetibles.

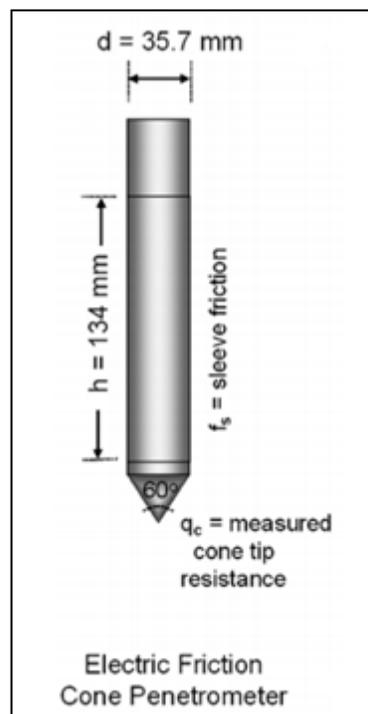


FIGURA 29. DIMENSIONES TÍPICAS DEL CONO PARA EL ENSAYO CPT (FUENTE: ASTM D5778, 2012)

3.2.3.3.6 Ensayo de Piezocono (CPTU)

Este ensayo corresponde a una variación del ensayo CPT, en la cual se incorporan transductores de presión de poros, y está normado al igual que el cono estático por la norma ASTM 5778. Además de la obtención de los parámetros de estratigrafía, coeficiente de fricción y cohesión del suelo, resistencia no drenada y el potencial de licuefacción del suelo, entrega datos sobre el estado de consolidación del suelo y el coeficiente de permeabilidad (Robertson, 2010).

En la Figura 30 se puede observar las dos configuraciones posibles del sensor que mide la presión de poros durante el ensayo.

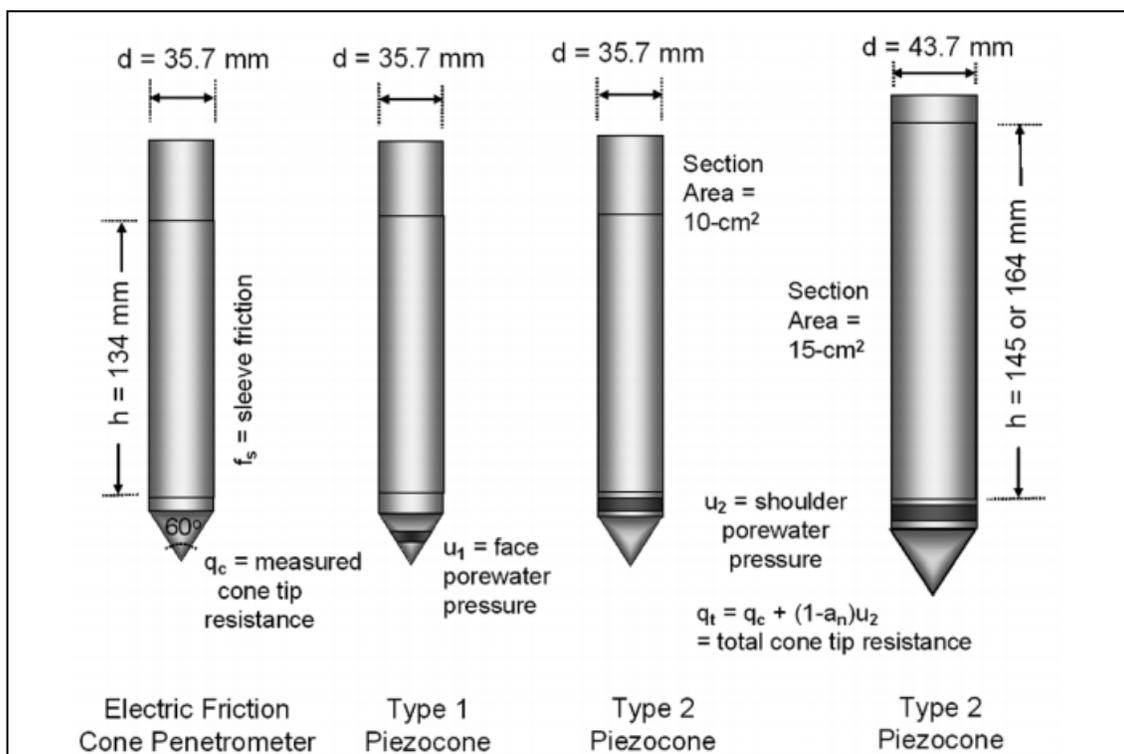


FIGURA 30. CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO CPT ESTÁTICO VERSUS LAS VERSIONES DEL PIEZOCONO. DE IZQUIERDA A DERECHA SE OBSERVA EL CONO CPT ESTÁTICO, EL CONO CPTU CON TRANSDUCTORES DE PRESIÓN DE POROS EN LA PUNTA, EL CONO CPTU CON TRANSDUCTORES DE PRESIÓN DE POROS EN LA MANGA Y FINALMENTE EL CONO CPTU CON EL TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DE POROS EN LA MANGA Y DIMENSIONES ALTERNATIVAS (FUENTE: ASTM D5778, 2012).

3.2.3.3.7 Ensayo Presiométrico

Este ensayo consiste en la introducción de una sonda cilíndrica en un sondaje pre excavado, la cual se dilata mediante una inyección de agua u otro, generando una deformación de las paredes del sondaje.

El presiómetro se desarrolla bajo dos procedimientos, el primero, un incremento constante de presión, o bien, el segundo, un incremento constante de volumen. El ensayo termina cuando la deformación del suelo continua aumentando a una misma presión. Se busca por medio de los cambios de volumen y de presión, la respuesta tensión-deformación del suelo, además de la obtención del módulo elástico (E) y una presión límite. A partir de estos datos, se puede obtener, la capacidad de soporte del suelo, el módulo de deformación presiométrico y el asentamiento de fundaciones. Estos resultados son utilizados principalmente para el diseño de fundaciones. (ROM 0.5, 2015).

El ensayo se encuentra regulado por la norma ASTM D4719, “Standard Test Methods for Prebored Pressuremeter Testing in Soils”, y según indica la Guía DOP: “... es aplicable a una amplia gama de suelos, desde depósitos finos blandos hasta rocas blandas...” (DOP, 2013, Vol. 2 Cap. 1, p.79).

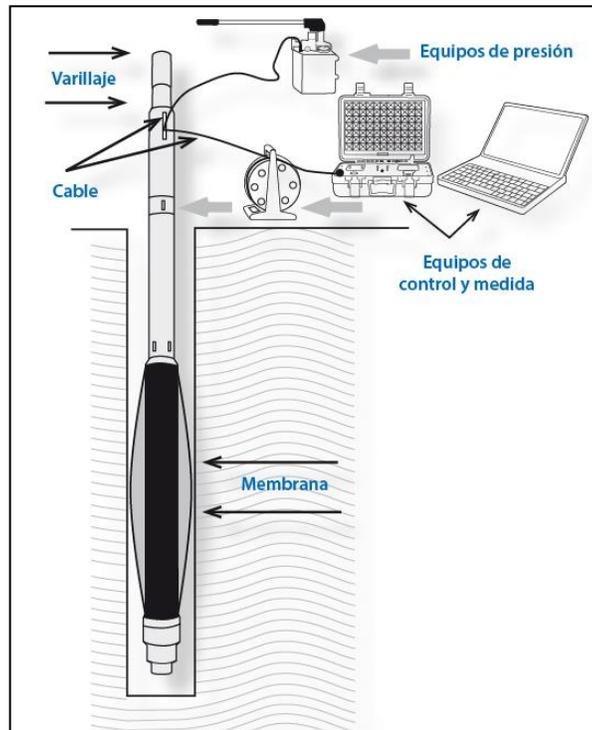


FIGURA 31. ESQUEMA DE ENSAYO PRESIOMÉTRICO (FUENTE: [HTTP://WWW.CODEXSA.COM/GEOTECNIA-Y-GEOLOGIA-CODEXSA](http://www.codexsa.com/geotecnia-y-geologia-codexsa) [CONSULTA 10-01-2018]).

3.2.3.3.8 Ensayo de Prueba de Carga en Pilotes

Son pruebas que se realizan al comienzo de la construcción, y buscan, bajo la aplicación de una carga, estudiar las deformaciones provocadas por la estructura y determinar la carga de rotura del pilote.

Si bien existen distintas maneras de ubicar un pilote en un proyecto, la Guía DOP hace referencia principalmente a pilotes hincados, en los cuales se relacionará la prueba de carga con el tiempo de espera y con el registro de hinca.



FIGURA 32. ENSAYO DE CARGA EN PILOTES. (FUENTE: CFT & ASOCIADOS. ENSAYOS Y PRUEBAS DE PILOTES, 2012).

3.2.3.4 ENSAYOS DE LABORATORIO

La norma Chile NCh 1508, presenta ensayos parecidos a los de la Guía DOP, pero la diferencia radica en cómo se dividen. En la Guía DOP los ensayos de laboratorio serán divididos en los realizados sobre muestras de suelo alteradas, a muestras de suelo inalteradas y los realizados a rocas.

Se entiende como muestra de suelo alterada o perturbada como una muestra que conserva la composición íntegra del suelo o roca de la que proviene, pero no su estructura (NCh 1508, 2014), mientras que una muestra inalterada o no perturbada es aquella que conserva la composición íntegra del suelo o roca natural, manteniendo su estructura interna.

El objetivo de los ensayos en laboratorio es confirmar las mediciones de terreno, complementar las mediciones de terreno o simplemente determinar propiedades geotécnicas del suelo, que no hayan sido estudiadas en terreno.

A continuación, se presentan los ensayos recomendados para muestras alteradas e inalteradas:

3.2.3.4.1 Muestras de Suelo Alteradas o Perturbadas:

- Granulometría
- Contenido de Humedad
- Límites de Atterberg
- Peso Específico

3.2.3.4.2 Muestras de Suelo Inalteradas o no Perturbadas:

- Peso unitario total
- Triaxiales CIU
- Corte directo no drenado
- Triaxial CID drenado
- Ensayo de Consolidación
- Ensayo de Compresión no confinada
- Ensayo Triaxial cíclico consolidado no drenado

3.2.3.4.3 Ensayos a Rocas

- Evaluación de la deformación y la resistencia a la compresión en condiciones uniaxiales
- Evaluación de la deformación y la resistencia a la compresión en condiciones triaxiales

Es importante destacar que los ensayos y pruebas que se recomiendan sobre muestras alteradas, también se podrían realizar sobre muestras no perturbadas, pues estas últimas, conservan todas las características del suelo natural. Por otro lado, la realización de pruebas recomendadas sobre muestras inalteradas de suelo sobre muestras alteradas no tiene sentido, pues tal como se explicó anteriormente, las propiedades del terreno natural no están presentes en su totalidad.

3.2.4 RECOMENDACIONES DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS DE CHILE (GUÍA DOP, 2013)

Antes de ahondar en las recomendaciones de la Guía DOP, es necesario definir algunos términos que serán utilizados a lo largo del presente trabajo:

Mandante: Persona o empresa que solicita un estudio o proyecto.

Consultor: Persona o empresa experta en el área de estudio, que presta apoyo de manera externa a dudas específicas en un proyecto.

Contratista: Persona o empresa que ejecuta la obra por contrato.

Especialista Geotécnico: Persona del área de la Ingeniería civil que estudia el comportamiento estático y dinámico de la zona superficial de la corteza terrestre bajo la acción de esfuerzos y/o la acción del agua (NCh 1508, 2014).

Aguas Abiertas: Agua que se encuentra expuesta a la acción de oleaje o corrientes.

Aguas Interiores: También conocidas como aguas protegidas o abrigadas, esta condición puede tener un origen natural o artificial, y hace referencia a que las aguas no se encuentran expuestas directamente a la acción del oleaje o corrientes. (DOP, 2014)

Naves Mayores: Aquellas mayores a 50 TRG (Toneladas de Registro Grueso), (DOP, 2013).

Naves Menores: Aquellas menores a 50 TRG (Toneladas de Registro Grueso), independiente de su actividad (DOP, 2013).

Si bien la Dirección de Obras Portuarias presenta en su guía una serie de ensayos que se pueden utilizar, también plantea ciertas prospecciones mínimas, las cuales son divididas según la tipología de la obra, a pesar de esta definición, se deja en claro que la decisión final de las prospecciones debe ser tomada por la empresa o por el especialista geotécnico.

A continuación se presenta una tabla (Tabla 4) donde se explicitan las siglas utilizadas para definir el tipo de prospección, que métodos son exigencias, y cuales

representan un complemento al estudio, el alcance en profundidad de cada método de estudio y finalmente, los resultados que se debiesen obtener.

TABLA 4. DEFINICIÓN DE SIGLAS Y PROSPECCIONES MÍNIMAS, SUS ALCANCES EN PROFUNDIDAD Y SUS RESULTADOS. (FUENTE: DOP, 2013)

Sigla	Nombre	Descripción	Característica	Toma de Muestras	Producto
SR	Sondaje Rotatorio	Sondaje rotatorio con SPT incluidos.	Independiente	Si	Caracterización estratigráfica del suelo bajo el lecho. Alcance normal de 10 a 20 m bajo el lecho rocoso.
CA	Calicatas	Excavación para toma de muestras.	Independiente	Si	Caracterización estratigráfica del estrato que logre la excavación. Alcance normal menor a 5 m de profundidad.
SG	Sondaje Geofísico	Mediciones y estudios de geofísica marina de alta resolución. Monocanal y/o Multicanal.	Complementario	No	Previo a calibración con sondajes rotatorios y/o lanzas de agua, caracterización global litológica, estratigráfica y estructural del suelo marino. Alcance normal hasta alcanzar estratos de gran densidad como roca.
SLA	Sondaje Preliminar	Sondaje con lanza de agua.	Complementario	No	Caracterización cualitativa de la resistencia del estrato que logre penetrar la lanza. Alcance normal menor a 6 m de profundidad.
SV	Sondaje Preliminar Visual	Sondaje visual tipo inspección submarina.	Complementario	No	Caracterización visual del lecho marino. Alcance superficial normalmente menor a 20 cm de profundidad.

Es importante recalcar que la guía indica que “...el especialista geotécnico tendrá la facultad de modificar las prospecciones mínimas... para cada proyecto en particular, presentando la debida justificación que respalde dicha modificación.” (DOP, 2013). Esto permite la posibilidad de ampliar el rango de exploración, pero al no ser una exigencia, se pueden presentar dificultades de una aceptación por parte del mandante. Adicionalmente la guía plantea que se puede utilizar informaciones provenientes de prospecciones anteriores, pero la responsabilidad de la misma recae sobre el ingeniero que la utiliza.

A continuación, se presentan dos tablas extraídas de la Guía DOP (Tabla 5 y Tabla 6), donde se presentan las prospecciones propuestas como mínimas según tipología. Estas prospecciones se consideran propuestas pues la Guía DOP no posee el carácter de norma, si no que corresponde a un conjunto de recomendaciones basadas en normas y recomendaciones extranjeras que se adapten a las condiciones de Chile.

TABLA 5. PROSPECCIONES MÍNIMAS PARA OBRAS DE ABRIGO Y OBRAS DE PROTECCIÓN. (FUENTE: DOP, 2013).

		AGUAS ABIERTAS Y AGUAS INTERIORES								
		NAVES MAYORES				NAVES MENORES				
TIPOS DE OBRAS		SR	SG	SLA	SV	SR	SG	SLA	SV	
Obras de Abrigo	Rompeolas de Gravedad	Dique Vertical	Cada 100 m con mínimo de 3	En toda la extensión del proyecto	Cada 40 m	-	Cada 100 m con mínimo de 2	-	Cada 40 m	-
		Dique en Talud	Cada 100 m con mínimo de 3	En toda la extensión del proyecto	Cada 40 m	-	Cada 100 m con mínimo de 2	-	Cada 40 m	-
		Dique Mixto	Cada 100 m con mínimo de 3	En toda la extensión del proyecto	Cada 40 m	-	Cada 100 m con mínimo de 2	-	Cada 40 m	-
	Rompeolas Flotantes	-	-	En zona de fondeo de anclas	En toda la extensión del proyecto	-	-	En zona de fondeo de anclas	En toda la extensión del proyecto	
	Rompeolas Sumergido (*)	-	-	Cada 40 m	En toda la extensión del proyecto	-	-	Cada 40 m	En toda la extensión del proyecto	
Obras de Protección	Espigones	Cada 70 m en eje longitudinal con mínimo de 3	-	-	-	Cada 70 m en eje longitudinal con mínimo de 3	-	-	-	
	Rompeolas Exento	Cada 70 m en eje longitudinal con mínimo de 3	-	-	-	Cada 70 m en eje longitudinal con mínimo de 3	-	-	-	
	Muros Costeros	Cada 70 m en eje longitudinal con mínimo de 3	-	-	-	Cada 70 m en eje longitudinal con mínimo de 3	-	-	-	
	Revestimientos	-	-	-	-	-	-	-	-	

(*) : Para los rompeolas sumergidos, dependiendo de los resultados de los sondeos preliminares (SLA) y los sondeos preliminares visuales (SV), el especialista podrá sugerir realizar Sondeos Rotatorios (SR).

**TABLA 6. PROSPECCIONES MÍNIMAS PARA OBRAS DE ATRAQUE Y AMARRA, Y PARA RAMPAS.
(FUENTE: DOP, 2013)**

		AGUAS ABIERTAS Y AGUAS INTERIORES								
		NAVES MAYORES				NAVES MENORES				
TIPOS DE OBRAS		SR	SG	SLA	SV	SR	SG	SLA	SV	
Obras de Atraque y Amarra	Terminal de Atraque	Muelle Marginal	-	-	-	-	-	-	-	En toda la extensión del proyecto
		Muelle de Penetración	Cada 70 m con mínimo de 3	En toda la extensión del proyecto	-	-	Cada 100 m con mínimo de 1	-	-	-
	Terminal de Boya	Monoboyas	-	-	En zona de fondeo de anclas	En toda la extensión del proyecto	-	-	En zona de fondeo de anclas	En toda la extensión del proyecto
		Multiboyas	-	-	En zona de fondeo de anclas	En toda la extensión del proyecto	-	-	En zona de fondeo de anclas	En toda la extensión del proyecto
	Duques de Alba		1 por cada elemento	-	-	-	1 por cada elemento	-	-	-
	Postes de Amarre		1 por cada elemento	-	-	-	1 por cada elemento	-	-	-
	Pontones Flotantes		Cada 70 m en eje longitudinal con mínimo de 3	En toda la extensión del proyecto	En zona de fondeo de anclas	En toda la extensión del proyecto	Cada 100 m en eje longitudinal con mínimo de 1	-	En zona de fondeo de anclas	En toda la extensión del proyecto
Rampas	Rampas Opacas	Cada 100 m en longitudinal con mínimo de 2	-	-	-	Cada 100 m en eje longitudinal con mínimo de 1	-	-	-	
	Rampas Transparentes	Cada 100 m en longitudinal con mínimo de 2	-	-	-	Cada 100 m en eje longitudinal con mínimo de 1	-	-	-	

Además de las tablas ya presentadas, existe una adicional que hace referencia a los ductos, pero esta tipología no será abordada dentro del presente trabajo, por este motivo no fue expuesta. Consiguientemente, la recomendación por tipología de obra se entrega para toda obra que se desarrolla en el país.

Respecto a la profundidad de los sondajes y calicatas, la Guía DOP plantea extender la penetración según fue expuesto en la sección 3.2.1.2.1., es decir, según los mismos criterios que para obras terrestres.

En cuanto a los métodos de reconocimiento geofísico, la Guía DOP recomienda para prospecciones en mar utilizar el método de refracción sísmica, y complementarlo con PS Logging. Por otro lado, también recomienda que la penetración mínima de las prospecciones geofísicas sea de 30 metros, salvo que exista roca a una profundidad menor.

La Dirección de Obras Portuarias (DOP), además de proponer un número de prospecciones mínimas en función de la tipología de obra a realizarse, cuenta con un resumen de las prospecciones a realizar en función de la propiedad del suelo que se obtiene como resultado. A continuación, se presenta una tabla extraída de la Guía DOP que exhibe lo mencionado.

TABLA 7. RESUMEN DE PROSPECCIONES (MODIFICADA DE: DOP, 2013).

Item	Objetivo	Prospección	Resultado
Estratigrafía	Perfil estratigráfico	Sondaje Calicata y zanja Geosísmica	Profundidad de fundación Espesor estratos blandos Estratificación
Propiedades Índices	Clasificación de los suelos	Muestra perturbada o no perturbada (Para gamma obligatoriamente no perturbada salvo que se mida in-situ)	Peso unitario total: γ Contenido de humedad: ω Peso específico partículas: γ_s Granulometría Límites de Atterberg: ω_L , ω_P
Conductividad Hidráulica	Coefficiente de permeabilidad	Ensayo In-situ Muestra no perturbada en laboratorio	Coefficiente de permeabilidad: k
Propiedades Geomecánicas	Capacidad de Soporte	Muestras no perturbadas Ensayo In-Situ	Resistencia a la compresión no confinada: q_u
	Estabilidad de taludes		Resistencia al corte no drenada: S_u
	Empuje de tierras		Resistencia al corte drenada Cohesión: c Ángulo de fricción: ϕ
	Características de consolidación	Muestras no perturbadas CPTU (in-situ)	Índices de compresión: C_r y C_c Tensión de preconsolidación: $\bar{\sigma}_{vm}$ Coefficiente de consolidación: c_v (c_n con CPTU)
	Deformabilidad	Muestra no perturbada en laboratorio Presiómetro (In-Situ) Ensayo de placa (in-situ)	Módulo de deformación no drenado: E_u Módulo de deformación por consolidación: E_c
Propiedades Geomecánicas	Propiedades dinámicas y clasificación sísmica	Muestras no perturbadas. Ensayos geosísmicos. CPT y SPT	Velocidad de onda de corte: v_s Módulo de corte: G (G para pequeñas deformaciones con geosísmica) Licuación o degradación cíclica
Compactación	Compacidad	Muestras perturbadas y no perturbadas. SPT	Peso unitario máximo: γ_{dmax} Peso unitario mínimo seco: γ_{dmin} Humedad óptima: ω_{opt} Densidad relativa: DR y CBR
Cuando se refiere a muestras perturbadas y no perturbadas significa que se ensayan en el laboratorio.			

3.3 LICITACIONES CHILENAS DE INFRAESTRUCTURA PORTUARIA

Durante el desarrollo de este trabajo, se han revisado una serie de licitaciones de infraestructura portuaria, a continuación, se presenta un resumen con las exploraciones pedidas por cada uno y el presupuesto disponible.

TABLA 8. SELECCIÓN DE LICITACIONES DE INFRAESTRUCTURA PORTUARIA CHILENAS ESTUDIADAS. (FUENTE: WWW.MERCADOPUBLICO.CL [CONSULTA ENERO 2017]).

Año	Estudio	Región	Presupuesto (CLP)	Tipología de Obra	Exploraciones Geotécnicas Requeridas
2016	Mecánica De Suelo Proyecto C. B. Costero Puyuhuapi	Aysén	74.000.000	Borde costero	Sondajes Terrestres (30ml) Sondajes marítimos 40 ml Calicatas 12 lab mecánica suelos, Informe geotécnico e informe de etapa
2016	Estudio Mecánica De Suelos, Muelle Provisorio Isla	Puerto Montt	11.000.000	Muelle provisorio	Sondajes marítimos (1 en zona de emplazamiento de 20m y 1 20m mínimo o hasta roca. Con STP c/1m), 2 calicatas
2016	Consultoría Mecánica S. Borde Lacustre Bertrand	Coyhaique	80.682.290	Mejoramiento borde lacustre para puerto	Sondaje Terrestres (30ml), Sondaje lacustres 30 ml, Calicatas 9, lab mec suelos y ensayos in situ, Informe geotécnico e informe de etapa
2016	Estudios Básicos Borde Costero Puerto Octay	Puerto Octay - Puerto Montt	82.960.000	Borde costero	Sondaje Terrestres (30ml), 2 Sondaje lacustres 20 ml c/u, Calicatas 3, ensayos in situ, informe de etapa
2015	Caleta Estaquilla	Llanquihue	89.751.000	Caleta	5 sondajes rotatorios marinos (20 ml c/u), 2 calicatas.
2016	Estudio Mecánica De Suelos De Borde Costero Arica	Arica	141.947.190	Borde costero	Se estudian 3 playas, en total, calicatas (50ml, sondajes marítimos (180ml)

TABLA 9. CONTINUACIÓN DE SELECCIÓN DE LICITACIONES DE INFRAESTRUCTURA PORTUARIA CHILENAS ESTUDIADAS. (FUENTE: WWW.MERCADOPUBLICO.CL [CONSULTA ENERO 2017]).

Año	Estudio	Región	Presupuesto (CLP)	Tipología de Obra	Exploraciones Geotécnicas Requeridas
2016	Investigación Geofísica (Obras Marítimas) Para El Puerto De Gran Escala En El Puerto De San Antonio - Abril 2016	Puerto San Antonio		Rompeolas, Terminal y círculo de maniobras.	Reflexión sísmica multicanal, ejecutando 4 perfiles paralelos a la costa (3,5 km aprox c/u) y 3 perfiles perpendiculares (1,0 km aprox c/u). Obteniendo perfiles verticales de subsuelo marino, singularidades, tipo de fondo y estratos.
2016	Investigación Geotécnica (Obras Marítimas) Para El Puerto De Gran Escala En El Puerto De San Antonio - Junio 2016	Puerto San Antonio		Rompeolas, Terminal y círculo de maniobras.	22 sondajes (18 de 30 metros y 4 de 40 metros de profundidad), con recuperación de muestras. Ensayos CPTU al interior de la mitad de los sondajes. (en el resto se privilegiará la toma de muestras) 4 ensayos PS Logging, en los sondajes de 40 metros. Ensayos de Laboratorio
2016	Estudios Básicos Infraestructura Quenuir Alto	Los Lagos	80.000.000	Ampliación de Muelle	3 calicatas y 3 sondajes
2016	Diseño Embarcaderos menores Isla del Rey	Los Ríos	264.420.000	Infraestructura Portuaria de Conectividad y de Pesca Artesanal	Incluye 1 etapa (de 5) de mecánica de suelos. Se estudian 4 sectores, y se requieren 8 calicatas y 6 sondajes fluviales

TABLA 10. CONTINUACIÓN DE SELECCIÓN DE LICITACIONES DE INFRAESTRUCTURA PORTUARIA CHILENAS ESTUDIADAS. (FUENTE: WWW.MERCADOPUBLICO.CL [CONSULTA ENERO 2017]).

Año	Estudio	Región	Presupuesto (CLP)	Tipología de Obra	Exploraciones Geotécnicas Requeridas
2015	Estudios Básicos mecánica de suelos Infraestructura Portuaria Caleta Estaquilla (2015)	Los Lagos	79.000.000	Estudios básicos para Infraestructura Portuaria de Pesca Artesanal	5 sondajes rotatorios marítimos (20 ml c/u) bajo la capa de fango, con ensayos SPT cada un metro de profundidad. 2 calicatas.

En su mayoría, las licitaciones estudiadas, que van entre los años 2015 y 2016, presentan exigencias muy similares en cuanto a los ensayos que se deben realizar in situ o en laboratorio

3.4 COMUNICACIÓN CON MANDANTES, CONSULTORES Y CONTRATISTAS.

Durante la elaboración de este trabajo se conversó con algunas instituciones para identificar cuáles son las deficiencias que ellos observan en la exploración geotécnica, su disposición a invertir en nuevos equipos, o la posibilidad de asociarse. Las empresas contactadas fueron las siguientes:

- Geovenor (Contratista)
- Fugro (Contratista)
- PMI Energy Services S.A. (Consultor)
- DOP. (Mandante)

En estos diálogos se pudo rescatar que en general, durante las exploraciones geotécnicas marítimas en Chile, para obras públicas, se utilizan pontones, estructuras flotantes que requieren anclaje. Estos pontones, no prestan la reacción necesaria para la implementación de ensayos CPT, por lo que se suelen realizar ensayos SPT. Para otro tipo de obras, también se utilizan pontones, pero se suma la posibilidad del uso de plataformas elevables, las cuales si permiten el desarrollo de ensayos CPT.

En cuanto a la implementación de otras metodologías de prospección no mencionadas en la Guía DOP se presentó el ensayo de corte por veleta, utilizado para el estudio de suelos finos, pero existen diferentes corrientes al respecto, pues algunos ingenieros recomiendan su uso únicamente en arcillas debido a la dificultad de alcanzar una condición no drenada en otros suelos.

Producto de estas comunicaciones, y según material presentado por algunas las instituciones mencionadas, se pudo realizar la siguiente generalización: El tipo de suelo principalmente observado en las costas Chilenas corresponde a arenas finas a

medias, o bien, arcillas limosas. A profundidades mayores, del orden de 50 metros o más se pueden encontrar arenas medias a gruesas, más bien densas y rocas de origen granítico

Por último, la geofísica marina de exploración no es usual, por lo que la obtención del dato de la velocidad de onda de corte en los distintos estratos no es frecuente. Esto, sumado con los ensayos SPT, genera que en ocasiones el potencial de licuación del suelo no sea bien estimado, y se produzcan desplazamientos laterales de las obras (Lateral Spread).

Una vez presentada la propuesta, se volverá citar a algunas de las empresas mencionadas, pues fueron consultadas en múltiples ocasiones durante el desarrollo del presente trabajo.

4. CONTEXTO INTERNACIONAL DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

La mayoría de los países, no poseen una norma dedicada a la exploración geotécnica marítima o fluvial, pero si existen manuales, o guías de buenas prácticas para el desarrollo de las mismas. Durante el desarrollo de este trabajo se revisaron documentos procedentes de varios países, a continuación se nombran los manuales estudiados y su país de procedencia. Posteriormente se analizarán las especificaciones encontradas en cada uno.

TABLA 11. RECOMENDACIONES Y NORMATIVA INTERNACIONAL ESTUDIADA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

Nombre del Documento	Origen	Año
Geotechnical and Geophysical Investigations for Offshore and Nearshore Developments.	The International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)	2005
Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan	Japón (The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan)	2002
NORKSOK Standard G-001 “Marine Soil Investigations”	Noruega	2004
ROM 0.5-05 “Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias “	España	2005
Recommendations of the “Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways” EAU 2012	Alemania	2012
BS 6349-1-3:2012 “Maritime Works: Part 1-3: General – Code of practice for Geotechnical Desing”	Reino Unido	2012
Engineering and Design: Geotechnical Investigations	Estados Unidos (US Army Corps of Engineers)	2001
Guidelines for Providing Geophysical, Geotechnical, and Geohazard Information Pursuant to 30 CFR Part 585	Estados Unidos (US Department of the Interior, Office of Renewable Energy Programs)	2015
Challenges of Offshore Geotechnical Engineering	Australia (Centre for Offshore Foundation Systems, The University of Western Australia)	2005
PIANC report n° 144: Classification of Soils and Rocks for the Maritime Dredging Process	PIANC. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure	2014

En los manuales y guías revisados se encuentran una serie de aspectos a considerar, en particular en este trabajo se evaluarán los siguientes:

- Herramientas de Perforación
- Técnicas de muestreo
- Exploración geofísica
- Ensayos In Situ

Estos tópicos fueron seleccionados debido a que las herramientas de perforación, la exploración geofísica y los ensayos in situ son temáticas que también se pueden observar en la Guía Chilena, mientras que en cuanto a las técnicas de muestreo, si bien no se mencionan en las recomendaciones de Chile, tienen una gran relevancia en los ensayos en laboratorio, pues la condición de la muestra (perturbada o no perturbada) define a que ensayos puede ser sometida.

4.1 HERRAMIENTAS DE PERFORACIÓN

De los documentos estudiados, los que hablan de este tema son los siguientes: “*Geotechnical and Geophysical Investigations for Offshore and Nearshore Developments*”, desarrollado por la ISSMGE, las “Recomendaciones para Obras Marítimas ROM 0.5-05”, de origen Español y el documento “*Challenges of Offshore Geotechnical Engineering*”, elaborado en la universidad de Western Australia. En ellos, se detallan los equipos de utilidad a la hora de realizar una exploración marítima. Según los manuales mencionados, el factor principal al momento de elegir la herramienta de exploración es la profundidad a la cual se encuentra el fondo marino, es decir, cuál es la altura de la columna de agua que se debe recorrer para llegar al suelo.

Según lo investigado, las principales herramientas de exploración marítima, tanto offshore (mar adentro) como nearshore (cercanas a la costa) son tres: Plataformas flotantes o semi-sumergibles, plataformas elevables (plataformas tipo Jack-up) y barcos perforadores (Drill ships). A continuación se describen dichas herramientas para llevar a cabo la exploración.

4.1.1 PLATAFORMAS FLOTANTES O SEMI-SUMERGIBLES

Existen plataformas flotantes o semi-sumergibles de diversos tamaños, por lo tanto, con diversas capacidades, que se pueden utilizar para alcanzar profundidades de hasta 600 metros. Las versiones de mayor tamaño cuentan con un sistema de reposicionamiento dinámico, el cual funciona mediante propulsores azimutales o bien, se fijan con líneas de anclajes, compuestos de hasta 12 anclas, cables o cadenas y suelen ser utilizadas con fines petrolíferos. Por otro lado, las versiones más pequeñas, consisten básicamente en un pontón, con sistema de flotación, que se fija mediante anclas, pero requiere condiciones relativamente calmas para su funcionamiento y se utilizan principalmente con fines de exploración geotécnica.

Para llegar al lugar de exploración, algunas plataformas poseen propulsión propia, mientras que otras tienen que ser remolcadas.

4.1.2 PLATAFORMAS ELEVABLES (PLATAFORMAS JACK-UP)

Este tipo de estructuras consisten en una plataforma flotante, que llega al lugar de exploración con las patas retraídas, y una vez ahí baja las patas fijándolas al fondo marino, elevando la plataforma para dejar una altura libre, de manera que el oleaje no pueda alcanzarla. El fijado de las patas se realiza sin utilizar demasiada fuerza, sobretodo en zonas de suelos blandos. La plataforma viene equipada con un mecanismo de perforación, de muestreo y de ensayos in situ. Es importante notar que existen plataformas Jack-up de una gran variedad de tamaños, las que alcanzan distintas profundidades de fondo marino y pueden operar bajo distintas condiciones, pero las de mayor tamaño alcanzan una profundidad de hasta 100 metros.

Estas plataformas se utilizan para exploración, perforación de sondajes o bien, para mantenimiento de pozos petrolíferos.



FIGURA 33. PLATAFORMA ELEVABLE TIPO JACK-UP (FUENTE: ISSMGE, 2005).

4.1.3 BARCOS DE PERFORACIÓN GEOTÉCNICA (DRILL SHIPS)

Son buques dotados de espacio suficiente para la maquinaria de exploración, además de un sistema de contra peso y sistemas de compensación. Representan la mejor opción para sondajes marinos costa afuera, pues alcanzan profundidades de exploración entre 200 y 1000 metros, o incluso más de ser necesario. La dificultad con la que se encuentran, es la necesidad de reposicionar el buque para que la exploración mantenga su verticalidad. Existen sistemas para mantener la posición, como el posicionamiento dinámico por medio de motores laterales o el sistema de anclaje multipunto.

Este tipo de barcos deben estar especialmente equipados para estudios de geofísica y geotécnica, además de disponer de una grúa o un similar para el manejo de equipo. Los barcos de mayor tamaño se utilizan generalmente para exploraciones

de obras mar adentro (offshore), mientras que las lanchas de menor tamaño, para estudios en la costa o cercanos (inshore y nearshore).



FIGURA 34. BARCO DE EXPLORACIÓN FUGRO DISCOVERY (FUENTE: WWW.FUGRO.COM [CONSULTA 29-03-2017]).

4.1.4 PLATAFORMA GEOFÍSICA OPERADA REMOTAMENTE

Adicionalmente a las herramientas de exploración típicas, existen un grupo de vehículos más bien autónomos, que se dividen en dos clases, vehículos operados remotamente (ROV - Remotely Operated Vehicles), y vehículos autónomos submarinos (AUV - Autonomous Underwater Vehicles). Ambos están equipados con equipos de medición geofísica, pero se diferencian principalmente en que los primeros, poseen un cable óptico y eléctrico que une al buque, cosa que reduce considerablemente su velocidad. Por otro lado, los segundos poseen independencia, no tienen ninguna conexión con el buque y tienen una batería que puede durar hasta 60 horas.

Estos equipos en lugar de poseer un sistema de perforación como tal, corresponden a una herramienta de exploración, pues en ocasiones no sólo vienen dotados con equipos de medición geofísica, sino que también pueden incluir algunos ensayos geotécnicos in situ.

4.2 TÉCNICAS DE MUESTREO

Cuando se busca conocer las propiedades de un suelo una de las maneras es mediante la toma de muestras que posteriormente serán analizadas en laboratorio. Al tomar muestra, se busca que la muestra esté lo menos alterada posible, o bien, obtener todas las características necesarias del suelo en condiciones naturales para poder luego remoldear la muestra, y lograr resultados representativos.

En general, según los manuales estudiados, para los estudios marítimos, fluviales o lacustres dentro de las exploraciones del sitio, se incluyen los sondajes,

también conocidos como estudios de pozo, con el objetivo de conocer el subsuelo. Estos pozos o sondajes se realizan empujando, rotando o martillando, siendo la primera la que entrega mayor calidad de muestras, por lo tanto, si el suelo a analizar corresponde a un suelo blando, realizar el muestreo empujando resulta la mejor opción. Para suelos más bien densos, el muestreo se realiza martillando o rotando. A continuación, en la sección 4.2.2 se enumeran algunos de los métodos recomendados. Adicional a esto, existen herramientas de muestreo que permiten extraer suelo únicamente de la superficie del fondo marino.

En algunos casos, para proyectos de gran envergadura, se cuenta con un laboratorio en terreno, pero para los casos donde no se cuente con un laboratorio de campo, es importante procurar que las condiciones de las muestras no varíen durante el traslado o almacenamiento, pues esto generaría resultados no concordantes con el suelo estudiado (ISSMGE, 2005).

En la normativa internacional estudiada, el muestreo es un tema frecuente, y se pudo encontrar en los manuales o guías de los siguientes países o instituciones:

- ISSMGE
- España (ROM)
- Estados Unidos (US Army Corps of Engineers)
- Noruega (NORKSOK Standard)
- PIANC

Las técnicas de muestreo se pueden dividir entre las herramientas de muestreo y los procedimientos habituales:

4.2.1 HERRAMIENTAS DE MUESTREO

En esta sección se describirán las herramientas de muestreo disponibles, ya sean para explorar el fondo marino, dentro de un sondaje o bien ambos. Es importante destacar que cada una tiene un tipo de suelo al que está dirigida, pues extraer una muestra de suelos más blandos es más sencillo que extraer una muestra de una roca.

4.2.1.1 SISTEMAS DE PERFORACIÓN DE ROCAS SUBMARINAS (UNDERWATER ROCK CORING SYSTEMS)

Mecanismo usado para la obtención de muestras de suelos duros. Se utilizan núcleos de tubo estático, o bien rotatorio, pero en presentación de doble o triple tubo, para perturbar lo menos posible la muestra.

4.2.1.2 MUESTREADOR DE GRAVEDAD BÁSICO (BASIC GRAVITY CORER)

Llamado así pues su peso es lo que lo lleva al fondo marino, permite realizar un control de tipos de suelos, pues entrega muestras continuas. Suelen estar equipados con pesos de plomo, para facilitar el entierre en el fondo marino, por este motivo, requieren buques en los cuales apoyarse, pudiéndose usar un amplio rango en función del núcleo utilizado. Son apropiados para exploraciones en arcillas blandas o firmes, pero no se recomienda para arenas o arcillas firmes, pues su uso es limitado en ellas.

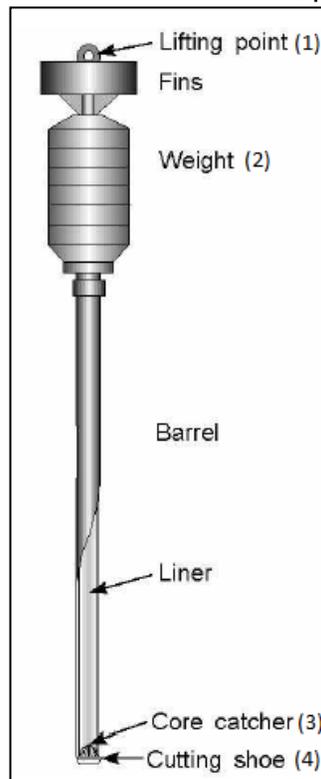


FIGURA 35. MUESTREADOR DE GRAVEDAD, SE PUEDE OBSERVAR (1) PUNTO DEL CUAL SE ELEVA EL PESO, (2) EL PESO, (3) ALMACENAMIENTO DE MUESTRA Y (4) CORTADOR DE MUESTRA. (MODIFICADA DE: ISSGME, 2005)

4.2.1.3 MUESTREADOR DE PISTÓN (PISTON CORER)

Muy similar al muestreador de gravedad, con la diferencia de que posee un pistón que al contacto con el fondo marino se libera, creando un tubo más largo. Es importante destacar que esto no significa que se obtenga una muestra más larga, sólo significa que permite que el sedimento blando sufra menor compresión o perturbación. Sus usos son principalmente para suelos blandos.

4.2.1.4 MUESTREADOR DE PISTÓN POR KULLENBERG (KULLENBERG DEVICE FOR PISTON CORER)

Dispositivo que busca asegurar una distancia de caída libre con más precisión que los muestreadores de gravedad, lo que permite conservar la condición del suelo, evitando afectarla por el impacto (ISSGME, 2005).

4.2.1.5 VIBROCORER:

Se utilizan cuando los muestreadores de gravedad no sirven, es decir, son utilizados en arenas, gravas, o suelos densos, o bien, cuando se busca alcanzar una profundidad de muestreo mayor. La diferencia radica en que el núcleo se vibra, lo que facilita la penetración en el suelo, pero al mismo tiempo, perturba la muestra (PIANC, 2014).

4.2.1.6 BOX CORERS

Envuelven un área de la superficie del fondo marino, y luego se sella la base, reteniendo una muestra que es relativamente no perturbada, ideal para suelos blandos o sedimentos cohesivos. El volumen muestreado puede ser de hasta 30 litros (ISSGME, 2005).



FIGURA 36. MUESTREADOR DE CAJA (FUENTE: ISSGME, 2005).

4.2.1.7 SEABED PUSH-IN SAMPLERS

Permite obtener muestras de buena calidad en suelos blandos. Se inserta en el suelo de manera controlada el muestreador mediante presión hidráulica o el peso del taladro. Cuando la muestra ya está en el interior del tubo, se cierra una válvula,

causando un efecto de succión. Existen algunos seabed push-in samplers que están equipados junto con una máquina CPT, lo que permite la correlación directa de los resultados del ensayo con las propiedades del suelo.

4.2.1.8 GRAB SAMPLERS

Sirve para conocer la superficie del fondo marino, está formado por dos clamshells, los cuales extraen una parte del suelo. Son especialmente buenas cuando se estudia suelos consolidados, ya que son capaces de extraer una muestra relativamente intacta, pero no son capaces de obtener muestras bajo 0,5 metros desde el fondo marino. (PIANC, 2014).

4.2.2 PROCEDIMIENTOS HABITUALES DE TOMA DE MUESTRAS EN SONDAJES

4.2.2.1 TUBOS TOMAMUESTRAS HINCADOS

La hincada del tubo se realiza en función de la dureza del suelo, y pueden ser hincados por presión o por vibración dependiendo de si la compacidad del terreno es baja o alta respectivamente. Se generan muestras poco alteradas, y se hincan tubos de pared delgada, también como conocidos como Shelby, los cuales permiten alterar menormente el suelo a analizar.

4.2.2.2 TUBOS PORTAMUESTRAS

Utilizados en sondeos mecánicos con rotación, la presencia de un doble tubo permite que en el interior la muestra se altere en menor medida. De igual manera, se obtienen muestras algo alteradas, y al ser un mecanismo por rotación, permite obtener muestras de suelos cohesivos de consistencia firme a muy firme y rocas (ROM 0.5, 2005).

4.2.2.3 TESTIGOS DE PERFORACIÓN

En los sondeos realizados con corona hueca, se obtiene en la parte interna, lo que se recupera del sondeo, pero esto representa muestras alteradas, pues incluso en muchas ocasiones no se logra recuperar la totalidad del testigo. Es principalmente útil para suelos cohesivos de consistencia firme a muy firme y rocas (ROM 0.5, 2005).

4.2.2.4 CUCHARA SPT

Según se describió previamente en la sección 3.2.3.3.3.

4.3 TÉCNICAS GEOFÍSICAS

La exploración geofísica en los documentos extranjeros estudiados son recurrentes, y en algunos, estas técnicas se tratan en bastante detalle. De los documentos estudiados a nivel internacional los que se refieren al respecto son:

- “Geotechnical and Geophysical Investigations for Offshore and Nearshore Developments”. (ISSMGE)
- ROM 0.5-05 “Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias “ (España).
- Engineering and Design: Geotechnical Investigations (US Army Corps of Engineers)
- Guidelines for Providing Geophysical, Geotechnical, and Geohazard Information Pursuant to 30 CFR Part 585 (US Department of the Interior, Office of Renewable Energy Programs)
- PIANC report n° 144: Classification of Soils and Rocks for the Maritime Dredging Process (PIANC)

Las técnicas de exploración geofísicas se pueden dividir en dos grandes grupos, en función de lo que busca medir: se puede querer realizar mediciones para batimetría, quienes buscan conocer entre otras cosas la distancia al fondo marino, o bien para geotecnia, donde se busca conocer el subsuelo y sus estratos.

4.3.1 GEOFÍSICA PARA ESTUDIOS BATIMÉTRICOS

Un estudio batimétrico busca información del fondo marino, para esto, se utilizan dos métodos, uno mediante imágenes, y uno mediante ondas, que utiliza la reflexión de ondas de ultra sonido, con instrumentos del tipo sonar. Si bien existen estos dos métodos los que se estudiarán en este trabajo incluyen únicamente los de reflexión, pues son los que utilizan la geofísica para su objetivo.

Los sistemas de reflexión utilizados para los estudios de fondo marino son de distinta índole, están los conocidos como *Echosounder*, los cuales miden directo desde un buque, la distancia al fondo. Por otro lado, también están los sistemas *Swath Bathymetry* que entregan resultados más completos que la anterior, pues miden en una franja perpendicular al avance del barco (PIANC, 2014).

En la siguiente figura se puede apreciar gráficamente los distintos funcionamientos de los métodos batimétricos:

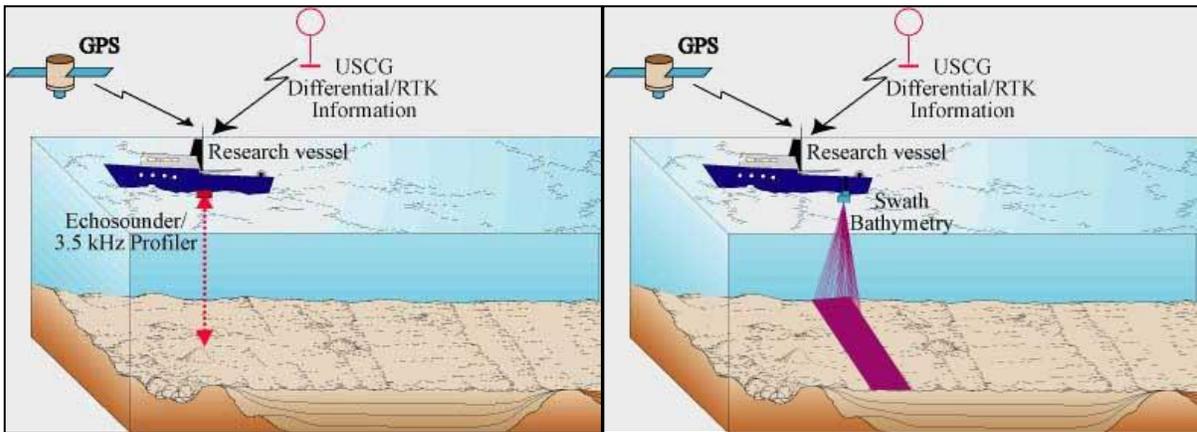


FIGURA 37. IZQUIERDA, MECANISMO DE MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD O FORMA DEL FONDO MARINO ECHOSOUNDER. DERECHA, MECANISMO DE MEDICIÓN DEL FONDO MARINO SWATH BATHIMETRY. (FUENTE: [HTTPS://WOODSHOLE.ER.USGS.GOV/](https://woodshole.er.usgs.gov/) [CONSULTA JUNIO 2017]).

Además de los sistemas ya mencionados existen otros que no están asociados directamente a un barco. Se tiene un sistema que es útil para aguas profundas y poco profundas, de 50 metros máximo, y claras (con poco contenido de partículas en suspensión), este método se llama LiDAR. Este método consiste en un laser, que se transporta de forma aérea, coexisten dos láseres, que se diferencian por la longitud de la onda que generan: el rojo, que se refleja en el mar, y el verde, que penetra hasta el fondo marino. El principal beneficio que tiene este método por sobre los anteriores es que al ser transportado por un medio aéreo, permite el acceso a sectores a los que no se puede llegar con un buque equipado con un sonar. En la Figura 38, se puede apreciar un diagrama del funcionamiento de esta metodología.

Por último, se tiene el método *Sidescan Sonar* (en la Figura 39), el cual a diferencia de los dos primeros, se desarrolla mediante dispositivos sumergibles, que son remolcados por un barco evitando así que el movimiento del barco perturbe las mediciones. Estos dispositivos sumergibles generan ondas acústicas, en un amplio rango, y con distintas inclinaciones, las cuales se reflejan en el fondo marino, distinguiendo en este reflejo la morfología.

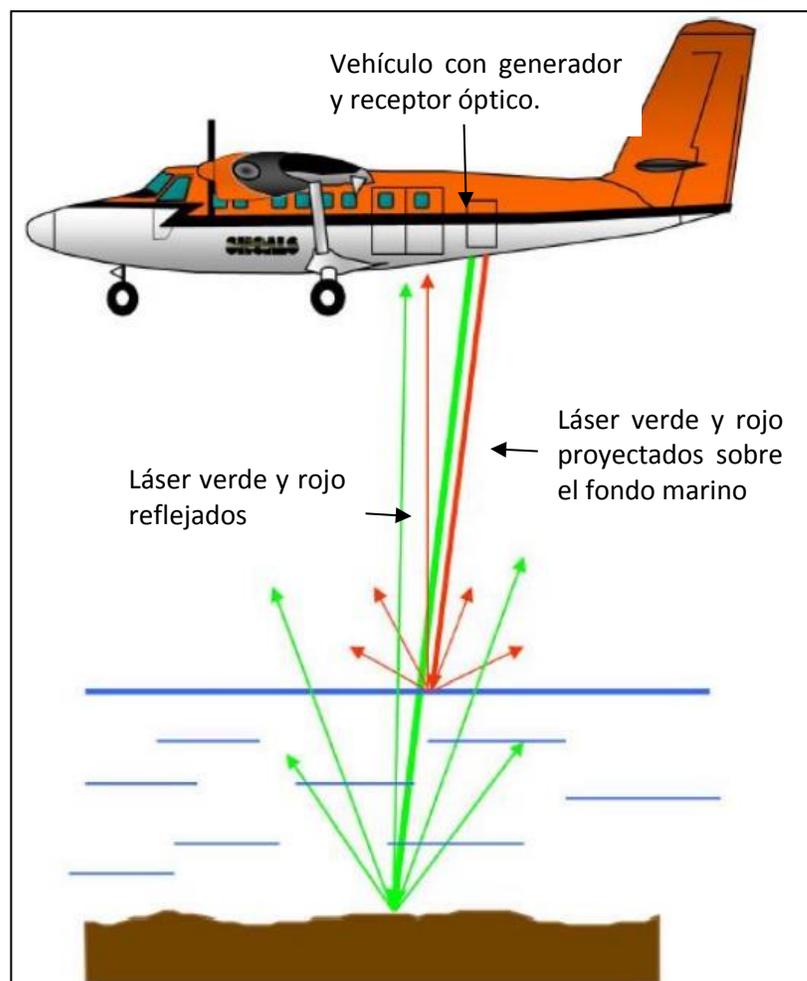


FIGURA 38. DIAGRAMA EXPLICATIVO DEL MÉTODO DE BATIMETRÍA MEDIANTE LIDAR. (MODIFICADA DE: [HTTP://AUCILLARESEARCHINSTITUTE.ORG/?PAGE_ID=134](http://aucillaresearchinstitute.org/?page_id=134) [CONSULTA JUNIO 2017]).

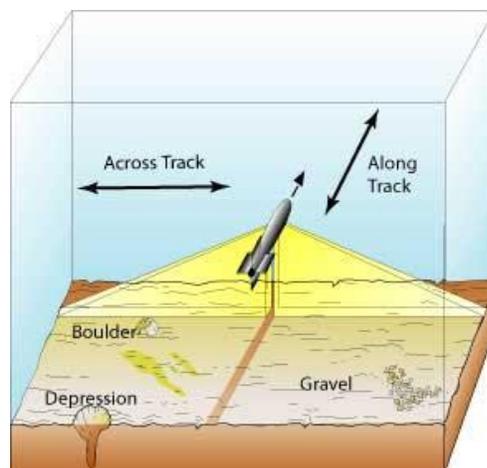


FIGURA 39. DIAGRAMA EXPLICATIVO DEL MÉTODO DE BATIMETRÍA POR SIDESCAN SONAR (FUENTE: [HTTPS://WOODSHOLE.ER.USGS.GOV](https://woodshole.er.usgs.gov) [CONSULTA JUNIO 2017]).

4.3.2 GEOFÍSICA PARA ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Cuando la geofísica se utiliza para explorar el subsuelo, se utilizan distintas frecuencias, o longitudes de onda, para que las ondas puedan penetrar hasta los estratos inferiores.

Las metodologías utilizadas difieren en el dato observado para el análisis, y corresponden a las siguientes:

- La medición de ondas, de alta resolución, reflejadas por los distintos estratos geológicos o por el fondo marino.
- Las asociadas a la refracción sísmica, donde se mide la refracción de ondas acústicas
- Las que miden la resistividad eléctrica, midiendo la resistencia del suelo marino a energía eléctrica,
- Las que miden aceleración de gravedad, también llamadas de gravimetría.
- Las de magnetometría, que permiten la detección de materiales magnéticos.

A continuación se revisará cada uno en mayor profundidad.

4.3.2.1 SISTEMAS DE REFLEXIÓN DE ONDAS SUBMARINO

Los sistemas de reflexión entregan una información que requiere ser interpretada, además de ser información más cualitativa que cuantitativa, por lo tanto, requiere de una calibración previa. Funcionan principalmente con dos tipos de ondas medidas: ondas sísmicas de compresión y ondas acústicas, pues la fuente emisora genera un estallido. Estos distintos tipos de onda se generan con diferentes fuentes emisoras, por ejemplo, *waterguson*, *airgun*, *sparkers*, *boomers*, *pingers*, entre otros.

La metodología que utiliza la reflexión de ondas sísmicas, es generalmente conocida como *Sub-bottom profiler*, y mide el tiempo de viaje de ondas de compresión desde su emisión a su regreso a la fuente, así la determinación de la estratificación del suelo marino. Es importante notar que la profundidad de la exploración es inversamente proporcional a la frecuencia de onda, es decir, mientras más baja la frecuencia, se puede explorar más profundo, pero se pierde resolución (ISSGME, 2005).

El principal problema que se puede presentar en este tipo de estudios es que se genere interferencia por medición de las ondas refractadas. También se pueden presentar dificultades en caso de presencia de bolsas de gas subterráneas, suelos muy densos o colonias biológicas.

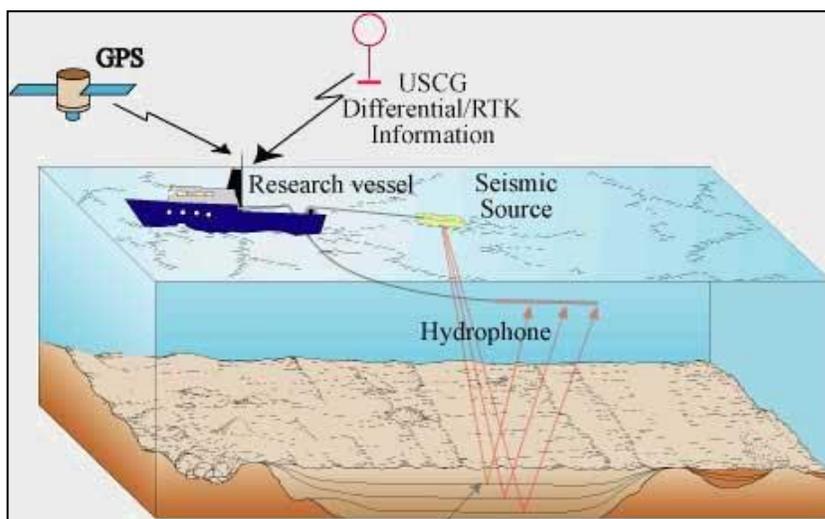


FIGURA 40. DIAGRAMA DEL FUNCIONAMIENTO DE REFLEXIÓN SÍSMICA (FUENTE: [HTTPS://WOODSHOLE.ER.USGS.GOV/OPERATIONS/SFMAPING/](https://woodshole.er.usgs.gov/operations/sfmapping/) [CONSULTA JUNIO 2017])).

4.3.2.2 SISTEMAS DE REFRACCIÓN DE ONDAS SUBMARINAS

En relación a los sistemas de refracción sísmica, se utilizan señales sísmicas de alta potencia, pero de baja frecuencia. Funcionan con un buque remolcando un trineo por el fondo marino, éste trineo está formado por una fuente, que genera una onda de presión acústica y una serie de hidrófonos, esta onda, es refractada por los distintos estratos y vuelve a la superficie. Para mejorar la calidad de los resultados se puede aumentar el número de hidrófonos que reciben ondas, además del largo en el que se distribuyen. Una de las principales ventajas de este método es que provee una información quasi-continua, lo cual permite programar de mejor manera la exploración geotécnica, por otro lado, la desventaja es que no se puede utilizar bajo los 350 metros, pues la fuente sísmica no lo permite (ISSGME, 2005).

Un equipo típico con el que se efectúa exploración con refracción de ondas tiene 48 hidrófonos, y mide entre 24 y 30 metros.

Las limitantes de los sistemas de refracción sísmica consisten en la necesidad de que los estratos estén organizados de más blando a más denso, de no ser así, la onda no recorrerá los estratos blandos ubicados entre otros más densos, generando sombras en dichas áreas (ISSGME, 2005), por otro lado, los estratos delgados en ocasiones pueden no ser detectados (US Army Corps of Engineers, 2001). En la Figura 41 se puede observar un esquema de cómo funciona la exploración con sistemas de refracción sísmica.

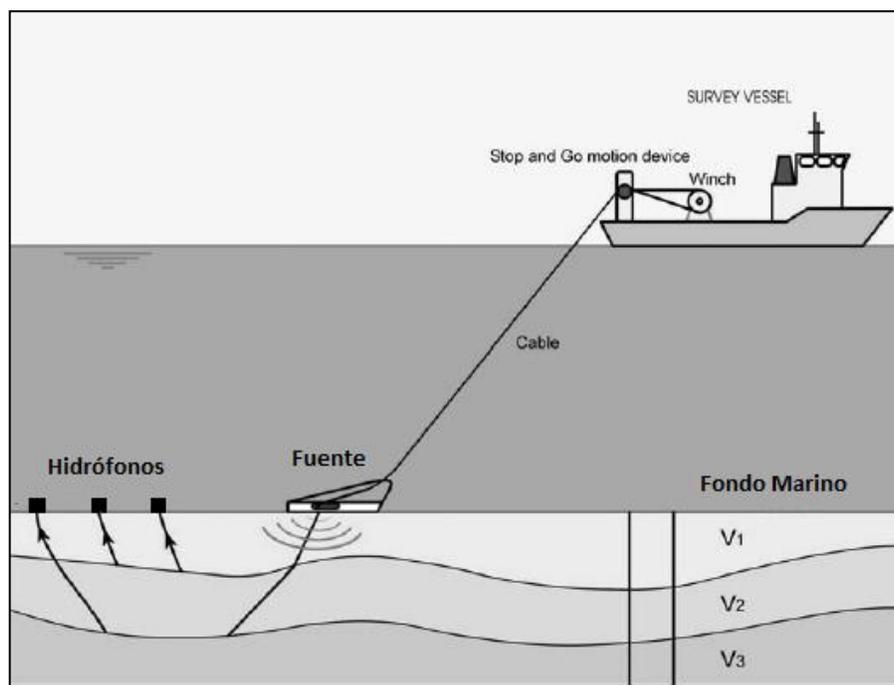


FIGURA 41. ESQUEMA DE MEDICIÓN POR REFRACCIÓN SÍSMICA. (MODIFICADA DE: ISSMGE, 2005).

4.3.2.3 SISTEMAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La exploración mediante resistividad eléctrica, al igual que la con refracción de ondas, se realiza remolcando un trineo que emite una onda eléctrica cuadrada entre un par de electrodos, creando un potencial eléctrico, el cual es medido por un electrodo de referencia. Todos estos electrodos van unidos a la fuente, generando una sola gran estructura en movimiento. La profundidad de la zona explorada aumenta con la separación de los electrodos, pero al mismo tiempo, se pierde precisión. La resistividad del suelo está relacionada con la porosidad del mismo, y esto entrega información sobre el estado de consolidación, independiente de esto, la información obtenida debe ser complementada por información obtenida de ensayos geotécnicos. En beneficio de esta técnica por sobre las otras es que entrega resultados continuos, y no se ve afectada por sedimentos cargados de gases, por otro lado, requiere mayor atención en la calibración, pues los resultados dependen de la profundidad del fondo marino, y de la salinidad del mar.

Esta metodología puede ser empleada para profundidades de hasta 20 metros y sirve principalmente para medir suelos superficiales, de no más de 5 metros. La recomendación es utilizarla en conjunto con otros métodos, pues si bien puede detectar grandes cuerpos de suelos blandos, las profundidades calculadas pueden incurrir en grandes errores (US Army Corps of Engineers, 2001).

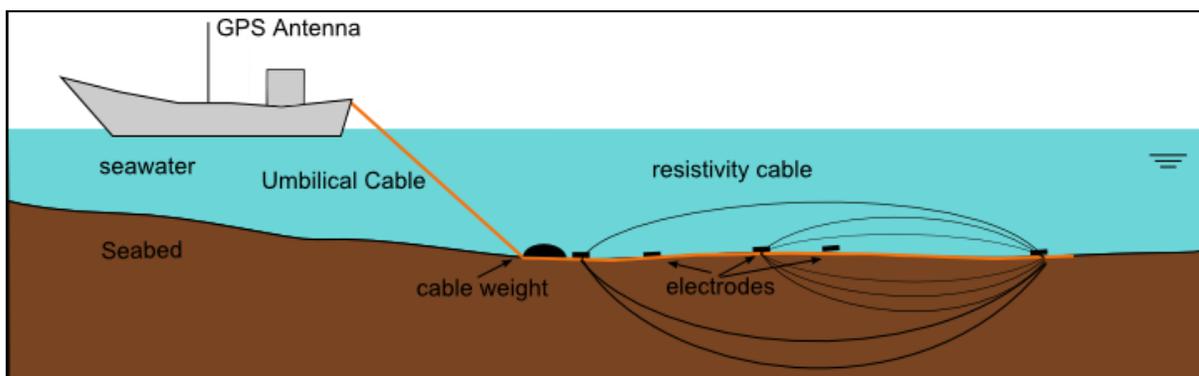


FIGURA 42. ESQUEMA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA. (FUENTE: [HTTP://OEMG-GLOBAL.COM/AQUARES-RESISTIVITY-SURVEYS/](http://oemg-global.com/aquares-resistivity-surveys/) [CONSULTA 4-12-2017]).

4.3.2.4 MAGNETOMETRÍA

Esta metodología se utiliza principalmente para detectar materiales magnéticos en el subsuelo, como tuberías, naufragios, entre otros. Para realizar la medición, y para que los resultados no se vean afectados por la barcaza o los otros instrumentos de estudio, el magnetómetro debe acercarse lo más posible al fondo marino, aceptándose una separación entre el instrumento y el fondo no mayor a 6 metros.

Las limitaciones de esta técnica son que sirve únicamente para la detección de materiales magnéticos, además de poseer una calibración compleja y los resultados, requieren ser interpretados por una persona altamente experta.

4.3.2.5 GRAVIMETRÍA

Las mediciones por gravimetría consisten en un equipo que mide de manera precisa la gravedad en distintos puntos, de este modo, permite la detección de vacíos, fallas e incluso domos salinos. Si bien los resultados que se obtienen son de una precisión razonable, el equipamiento utilizado es de muy alto costo, además, cualquier objeto con una alta masa cercano puede influenciar los resultados, además de la topografía y la densidad de los estratos. Dada la sensibilidad de esta metodología, se considera poco precisa para estudios geotécnicos, por lo tanto no es recomendable para esa finalidad.

4.4 TÉCNICAS GEOTÉCNICAS

Las técnicas geotécnicas se desarrollan principalmente de dos maneras: mediante ensayos dentro de un sondaje previamente perforado, adosando la herramienta necesaria a la máquina perforadora o bien, mediante ensayos desarrollados directamente en el fondo marino. A partir de cada tipo de ensayo se pueden obtener diferentes parámetros del suelo, además de ser algunas metodologías más óptimas que otras para distintos tipos de suelo. Por otro lado, también se debe tener en consideración los límites que posee la maquinaria utilizada en cuanto a la columna de agua que puede resistir y la profundidad máxima que puede alcanzar.

Los ensayos in-situ tienen el beneficio de que la muestra a analizar se encuentra exactamente con las características originales, mientras que al ensayar en laboratorio una muestra de terreno, existe la posibilidad de que la muestra esté perturbada, ya sea por el mantenimiento de la muestra o bien por el método mediante el cual fue obtenida. Para obras marítimas o fluviales, los ensayos in-situ cobran una gran importancia, pues a veces, es la única manera de obtener parámetros ingenieriles para suelos no cohesivos.

La mayoría de la normativa y recomendaciones estudiada hace referencia a las técnicas de ensayos in-situ. La diferencia radica en la importancia que se le da, y la extensión de las recomendaciones. Los siguientes documentos fueron consultados al respecto:

- “Geotechnical and Geophysical Investigations for Offshore and Nearshore Developments”. (ISSMGE)
- ROM 0.5-05 “Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias “ (España).
- Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan (Japón - The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan)
- Recommendations of the “Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways” EAU 2012 (Alemania)
- BS 6349-1-3:2012 “Maritime Works: Part 1-3: General – Code of practice for Geotechnical Design” (Reino Unido)
- NORKSOK Standard G-001 “Marine Soil Investigations” (Noruega)
- Engineering and Design: Geotechnical Investigations (US Army Corps of Engineers)
- Guidelines for Providing Geophysical, Geotechnical, and Geohazard Information Pursuant to 30 CFR Part 585 (US Department of the Interior, Office of Renewable Energy Programs)
- Challenges of Offshore Geotechnical Engineering (Centre for Offshore Foundation Systems, The University of Western Australia)

La única guía que no posee un detalle es la correspondiente a PIANC, pero esta misma, señala a la guía de la ISSMGE como poseedora un buen detalle de los ensayos a realizar.

A continuación se describen los ensayos recomendados por las diferentes normas, guías o manuales.

4.4.1 ENSAYOS DE PENETRACIÓN DE CONO (CPT) EN FONDO MARINO

Este ensayo, normado por la ASTM, es ampliamente usado para la exploración de obras marítimas. Puede entregar información del tipo de suelo, su estratificación, su densidad relativa y ángulo de fricción interna en arenas y corte no drenado en arcillas, según se presentó en la sección 3.2.3.3.5. El ensayo consiste en empujar a una velocidad constante (20 mm por segundo) el cono estándar. Existen diferentes configuraciones de equipos que realizan CPT, los cuales tienen diferentes configuraciones, dificultades y capacidad de penetración, pudiendo alcanzarse penetraciones de hasta 50 a 70 metros.

Cuando este ensayo es requerido en aguas profundas, donde plataformas elevables o flotantes no pueden explorar, se utilizan vehículos ROV, los cuales pueden implementar este ensayo y otros (ISSGME, 2005).

Adicionalmente, a este ensayo se le pueden agregar ciertas herramientas, que permiten la obtención de una mayor cantidad de información. Las variaciones utilizadas para obras marítimas o fluviales suelen ser las siguientes:

4.4.1.1 CPT estático:

Según fue descrito en la sección 3.2.3.3.5.

4.4.1.2 CPTU:

Según fue descrito en la sección 3.2.3.3.6.

4.4.1.3 CONO SÍSMICO (SCPT):

El ensayo del cono sísmico, definido por la norma ASTM D7400, y consiste en que se emite una onda de corte en superficie terrestre, para mediciones en tierra, o en la superficie del fondo marino, para exploración marítima. Esta señal es recibida por el o los receptores ubicados en el cono, mientras el cono es empujado en la tierra hasta la profundidad deseada, obteniéndose como resultado la velocidad de onda de corte (V_s) para los distintos estratos. Para la obtención de un módulo de corte máximo por resultados de este ensayo, es necesario determinar adicionalmente la densidad del suelo en función de su profundidad. Este ensayo se puede realizar en conjunto con un CPT o bien, con un CPTU, y durante el mismo, se debe tener precaución para evitar la rotación del equipo (ASTM D7400, 2014).

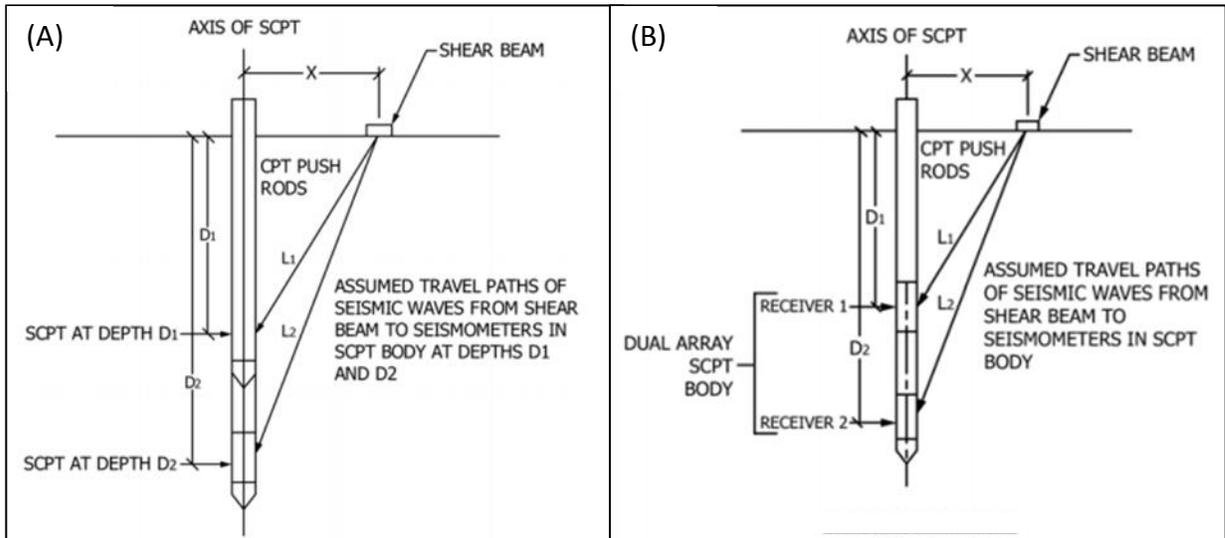


FIGURA 43. ESQUEMAS DE ENSAYO CONO SÍSMICO, VISTA EN SECCIÓN TRANSVERSAL (A) RECEPTOR ÚNICO. (B) RECEPTOR DUAL. (FUENTE: ASTM D7400, 2014)

4.4.1.4 TERMAL CONDUCTIVITY PROBE

El también conocido como Termal Cone Test es una de las tecnologías adicionales que se pueden aplicar en un ensayo CPT, corresponde a una prueba de conductividad térmica. Se utiliza para determinar la tasa de transferencia de calor a través del suelo. El sistema cuenta además de un penetrómetro de 5 cm² clásico, con una sonda de conductividad térmica fuera del eje, el calor es generado por un calentador y posee un sensor de alta precisión, ambos vienen incorporados. Este sistema se utiliza comúnmente para determinar las consideraciones a tener en obras de tipo ductos o tuberías (ISSGME, 2005).

4.4.1.5 ELECTRICAL CONDUCTIVITY CONE

Al igual que el ensayo de conductividad termal, el ensayo de conductividad eléctrica es una tecnología que se aplica en conjunto con el ensayo CPT. La conductividad eléctrica de un suelo depende de muchos factores, tales como el tipo de suelo, la porosidad, el contenido de agua y la salinidad de la misma. Este tipo de ensayos se utilizan principalmente para encontrar el potencial de corrosión en tuberías y estructuras (ISSGME, 2005).

4.4.1.6 GAMA NATURAL

Al ensayo CPT se le puede adicionar un sensor el cual detecta la radiación de gamma natural del suelo. Los registros de la radiación gamma, permiten diferenciar la estratigrafía del suelo (Brouwer, 2007) y calcular las densidades del mismo (ISSMGE, 2005).

4.4.2 CPT DINÁMICO:

Según fue descrito en 3.2.3.3.4.

4.4.3 ENSAYO DEL MINICONO

El ensayo de penetración del minicono funciona igual que un CPT, pero con un cono aproximadamente de 1/10 del cono estándar, pero al ser más pequeño es más manejable. Si bien no cumple los estándares internacionales, tiene el beneficio de que requiere buques o plataformas de menos tamaño para ser implementado, generando un rango más amplio para su uso. Se pueden alcanzar penetraciones de 5 o 6 metros y logra detectar capas esbeltas de arena ubicadas dentro de arcillas blandas.

4.4.4 ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)

Según fue descrito en la sección 3.2.3.3.3.

4.4.5 ENSAYO DE CORTE POR VELETA

Este ensayo corresponde a una prueba de corte que se desarrolla en pozos, que permite medir el corte no drenado de suelos cohesivos, como arcillas blandas. Se inserta la veleta en el suelo, y se rota hasta que el suelo falle, midiendo el torque. Las ventajas que tiene este ensayo son que entrega resultados de esfuerzo continuos y que mide directamente el peak de corte en el que se presenta la falla.

El ensayo se rige según la norma ASTM D2573, puede presentar distintas geometrías, pero todas formadas por cuatro placas de metal delgadas y planas, fijadas, usualmente, con ángulo de 90 grados entre sí. En cuanto a las dimensiones de la veleta, el espesor varía entre 0,8 y 3 mm, mientras que el diámetro puede ir entre 35 y 100 mm, por último, la altura se define en función del diámetro, pudiendo ir entre 1 y 2,5 veces el mismo (ASTM D2573, 2015).

En la siguiente figura se pueden apreciar las geometrías que se presentan.

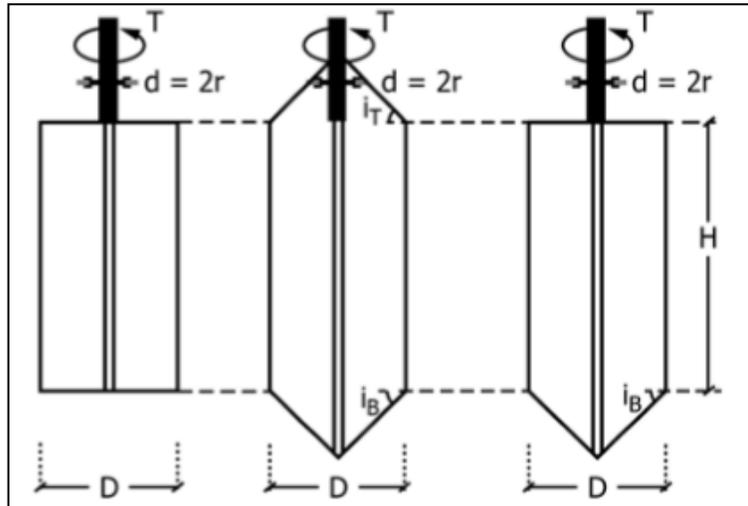


FIGURA 44. GEOMETRÍA OBSERVADA DE LA VELETA UTILIZADA EN EL ENSAYO (ASTM D2573, 2015)

4.4.6 ENSAYOS DE PENETRACIÓN T-BAR Y BALL

Son ensayos que consisten en empujar la herramienta en el suelo para medir la fuerza de corte, el tipo T-bar se puede desarrollar solo en fondo marino, mientras que el tipo Ball se puede aplicar en el fondo marino o en pozo. Son especialmente precisos en arcillas muy blandas. Al igual que en el ensayo CPT, la barra o bola se entierran a 20 mm por segundo, pero el análisis de sus resultados es más sencillo.



FIGURA 45. HERRAMIENTA UTILIZADA PARA LOS ENSAYOS T-BAR Y BALL PROBE (FUENTE: ISSMGE, 2005).

4.4.7 PRESIOMETRO

Según fue descrito en la sección 3.2.3.3.7.

4.4.8 DILATOMETRO

Existen dos tipos de dilatómetro, uno formado por una placa plana, y otro cilíndrico, y se diferencian en que el primero, funciona para un rango de suelos menor que el presiómetro, mientras que el cilíndrico es para uso en rocas.

4.4.8.1 Dilatómetro Plano

El ensayo del dilatómetro, también conocido como *Flat Dilatometer Test (DMT)*, se encuentra regido por la norma ASTM D6635-15, y es un ensayo de penetración, por lo tanto no requiere de un sondaje previamente perforado, que consiste en, una vez ubicado a la profundidad deseada, infla su membrana circular, midiendo la expansión. El método es recomendado para suelos arenosos, arcillas u suelos orgánicos, pues en estos suelos las partículas son pequeñas en comparación con el tamaño de la membrana, y en base a los resultados del ensayo se puede obtener información respecto a al estratigrafía, resistencia, compresibilidad y presión de poros. Estos datos pueden ser utilizados para el cálculo de taludes y fundaciones. En la Figura 46 se observa la placa utilizada para este ensayo.

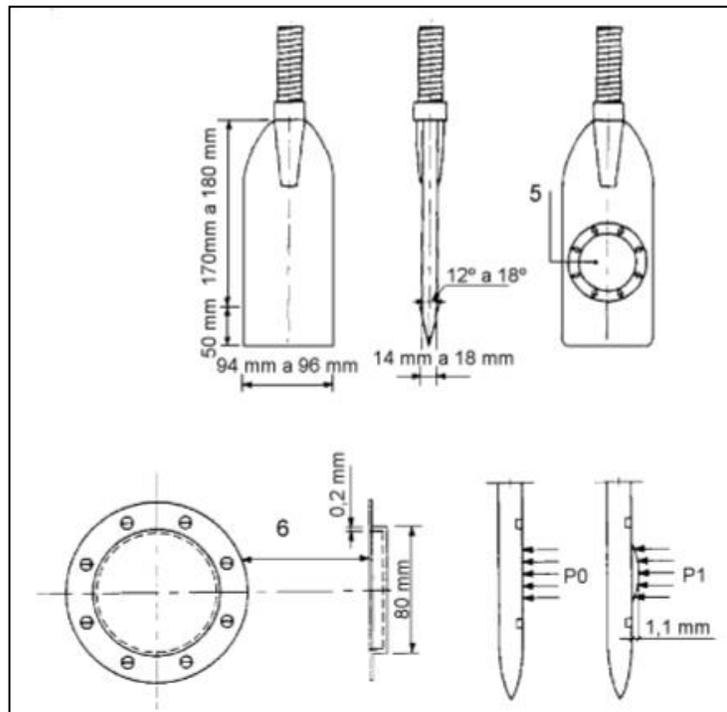


FIGURA 46. CONFIGURACIÓN Y DIMENSIONES DE LA PLACA UTILIZADA PARA EL ENSAYO DEL DILATOMETRO PLANO (FUENTE: EUROCÓDIGO 7, 2002)

4.4.8.1 Dilatómetro Cilíndrico

El ensayo del dilatómetro cilíndrico, o dilatómetro para rocas, según lo describe el Eurocódigo 7 consiste en una sonda cilíndrica, la cual es insertada en un sondaje previamente perforado, ésta sonda se expande, generando una presión radial uniforme. Durante la expansión, se realizan mediciones semi-continuas de la variación

de la deformación en profundidad. Como resultados de este ensayo se obtienen las propiedades de deformación y fluencia de la roca, además de poderse calcular el módulo de Poisson de la roca ensayada.

4.4.9 SWEDISH WEIGHT SOUNDING TEST (WST)

El ensayo WST, también conocido como ensayo con sonda lastrada, es un ensayo de penetración que se caracteriza por ser de operación más simple respecto al SPT, es comúnmente utilizado en países Nórdicos y en Japón (Cheshomi, 2006). El ensayo consiste en una punta enroscada, en forma de tornillo, la cual es cargada mediante un dispositivo de rotación.

La maquinaria de este ensayo permite su uso en todo tipo de suelos, exceptuando gravas, bolones y rocas (The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2002). Durante el ensayo se mide asentamiento por carga (W_{sw}) y el número de revoluciones cada 1 metro de penetración (N_{sw}), a partir de estos valores, se puede calcular la compresión no confinada del suelo (q_u) Se obtiene un perfil continuo del suelo, y mediante correlaciones se puede calcular el potencial de licuación del mismo (Tsukamoto, 2015).

En la Figura 47 se observa la punta utilizada para el desarrollo de este ensayo, junto con las dimensiones del mismo.

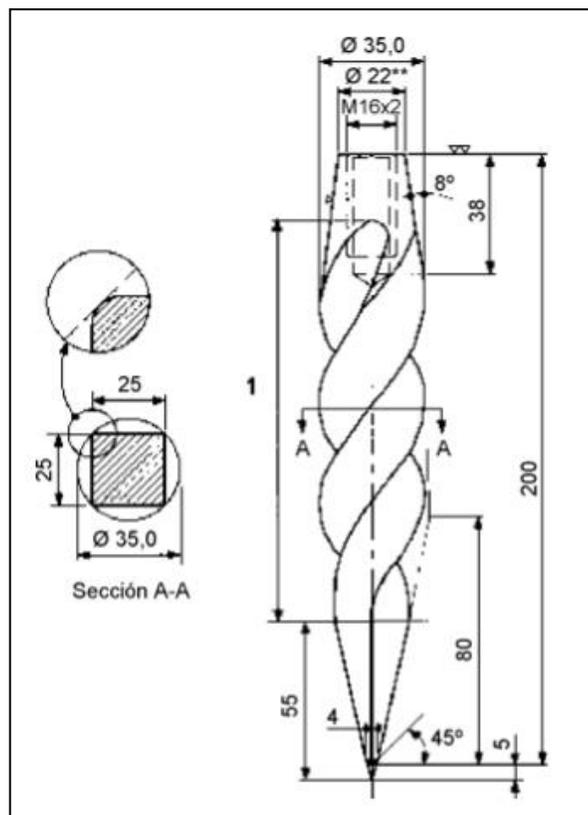


FIGURA 47. PUNTA PARA EL ENSAYO SWS. (FUENTE: EUROCÓDIGO 7,2002).

4.4.10 LLT (BOREHOLE LATERAL LOAD TEST)

El ensayo de carga lateral, utilizado para calcular la deformación horizontal del suelo, entregando resultados del tipo discontinuo. Este ensayo se puede desarrollar en todo tipo de suelo, mientras la pared del pozo sea lisa y libre, los parámetros que mide son presión y desplazamientos, a partir de estos parámetros se puede calcular el coeficiente de empuje horizontal para fundaciones de pilotes (K_H).

4.4.11 BAT/DGP

Los ensayos BAT y DGP son ensayos que se desarrollan dentro de un pozo, y son utilizados para definir el coeficiente de permeabilidad del suelo, junto con el grado de saturación de gas del agua. Durante el ensayo se entierra la probeta a una velocidad de 1 o 2 cm/s, y se miden los cambios de presión, el flujo de agua y la temperatura.

La duración del ensayo varía según el tipo de suelo estudiado, entra 60 y 120 minutos, dependiendo si es arcilla o arena.

La siguiente tabla muestra un resumen de los ensayos in situ según su presencia en los distintos documentos estudiados.

TABLA 12. ENSAYOS RECOMENDADOS EN LAS NORMAS, GUÍAS Y MANUALES ESTUDIADOS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

Nombre del Documento	C P T	C P T U	CPT diná mico	Ensayo del Minicono	S P T	Corte por Veleta	T-BAR Y BALL	Termal conductivity probe	Electrical conductivity cone	S C P T	Natural Gamma	Dilato metro	Presio metro	W S T	L L T	BAT o DGP
Geotechnical and Geophysical Investigations for Offshore and Nearshore Developments.	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan	X	X	X	X	X	X								X	X	
NORKSOK Standard G-001 "Marine Soil Investigations"	X	X				X	X		X	X			X			X
ROM 0.5-05 "Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias "	X	X	X		X	X							X			
Recommendations of the "Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways" EAU 2012	X	X				X										
BS 6349-1-3:2012 "Maritime Works: Part 1-3: General – Code of practice for Geotechnical Desing"	X	X	X		X	X							X	X		
Engineering and Design: Geotechnical Investigations (US Army Corps)	X				X	X							X			
Guidelines for Providing Geophysical, Geotechnical, and Geohazard Information Pursuant to 30 CFR Part 585	X															
Challenges of Offshore Geotechnical Engineering	X					X	X									
WST = Swedish weight sounding test LLT = Lateral load Test BAT o DGP = Deep water gas probe																

5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROSPECCIONES Y PROPUESTA METODOLÓGICA DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS DE OBRAS MARÍTIMAS

En este capítulo se pretende comparar las metodologías de exploración marítima utilizadas en el extranjero con las utilizadas en Chile. Se buscará comparar también las condiciones ambientales, que se encuentran en los distintos lugares, a modo de notar que la exploración debe considerar estos aspectos. También comparar las obras que se construyen, pues la exploración debiese ser distinta dependiendo de la magnitud de la obra analizada.

Al final de este capítulo, se plantea una mejora metodológica de exploración geotécnica para el caso chileno.

5.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROSPECCIONES

De la revisión de las prospecciones mínimas propuestas por el Ministerio de Obras Públicas en la Guía DOP se puede apreciar que los ensayos in situ y exploraciones propuestas corresponden principalmente a 4 tipos:

- Sondaje Rotatorio con SPT
- Lanza de Agua
- Sondaje Geofísico (Refracción sísmica)
- Inspección Visual (Sondaje preliminar visual)

Estas prospecciones, se distribuyen según la tipología de la obra, y cada tipología, se subdivide según el tamaño de las nave (Naves Menores y Naves Mayores), dando como resultado los siguientes diagramas, que se utilizarán de base para la proposición de una metodología mejorada. Las tipologías: Terminales de boyas, revestimientos, duques de alba, postes de amarre, pontones flotantes y ductos no serán cubiertos con una nueva metodología.

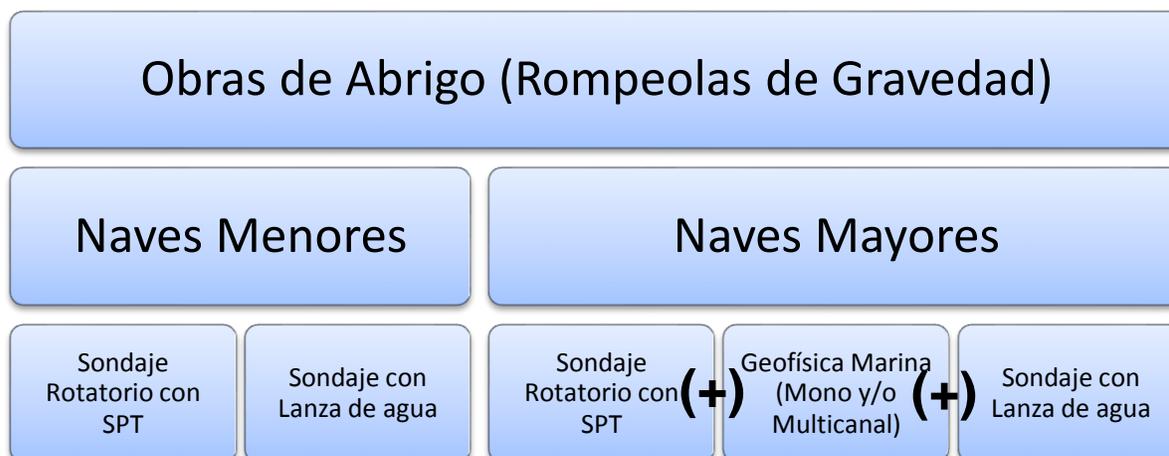


FIGURA 48. DIAGRAMA DE EXPLORACIÓN PARA OBRAS DE ABRIGO (ROMPEOLAS DE GRAVEDAD). (FUENTE: DOP, 2013).

Para el caso de obras de Abrigo, se puede observar que siempre se solicita sondaje rotatorio con ensayos SPT y sondaje con lanzas de agua, pero cuando las naves que utilizarán la zona, tiene sobre 50 toneladas de registro grueso, se adiciona un ensayo de geofísica marina batimétrica mono o multicanal.



FIGURA 49. DIAGRAMA DE EXPLORACIÓN PARA OBRAS DE PROTECCIÓN (ESPIGONES, ROMPEOLAS EXENTO Y MUROS COSTEROS). (FUENTE: DOP, 2013).

Para espigones, rompeolas exento y muros costeros las prospecciones mínimas consisten únicamente en sondajes rotatorios con ensayo in situ SPT.

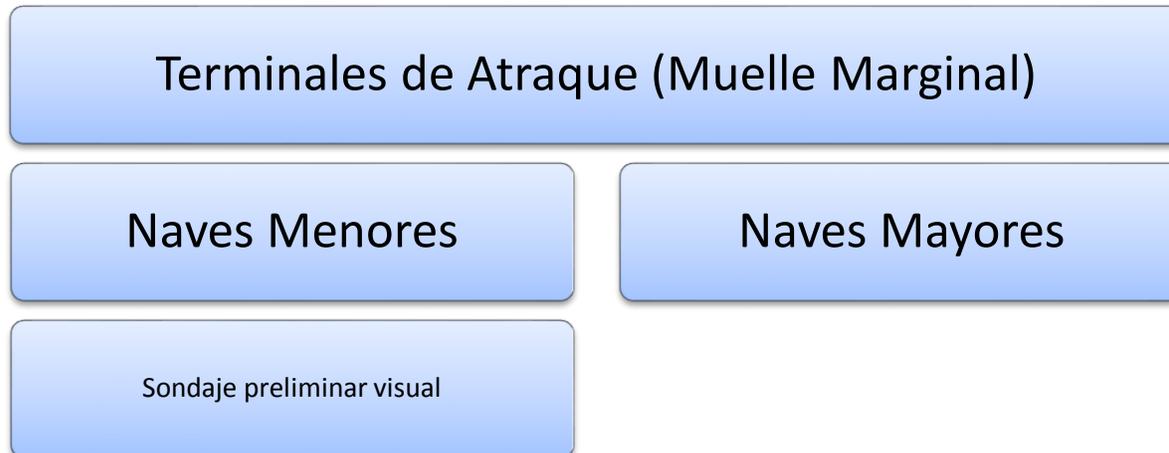


FIGURA 50. DIAGRAMA DE EXPLORACIÓN PARA TERMINALES DE ATRAQUE (MUELLE MARGINAL). (FUENTE: DOP, 2013).

En este punto, es importante notar que la DOP en su guía no propone prospecciones mínimas para el caso de un muelle marginal con naves mayores. Esto no quiere decir que no se realicen ensayos ni exploraciones, sino que simplemente lo dejan en manos del especialista geotécnico. Un ejemplo de esto sería el puerto San Antonio, que clasifica como muelle marginal pues se ubica paralelo al borde costero, y según se vio en la sección 3.3, al buscar su expansión se solicitaron una amplia gama de prospecciones.

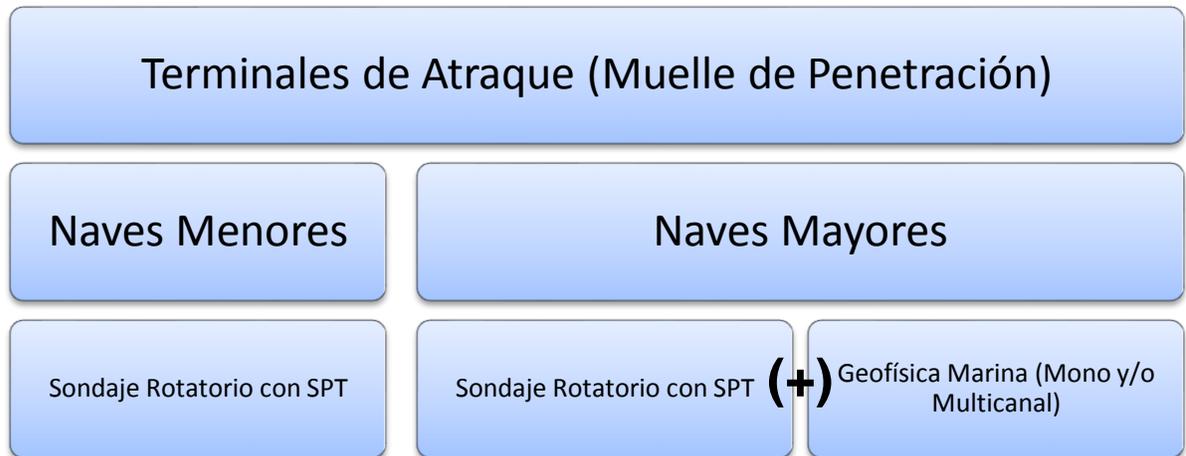


FIGURA 51. DIAGRAMA DE EXPLORACIÓN PARA TERMINALES DE ATRAQUE (MUELLE DE PENETRACIÓN). (FUENTE: DOP, 2013).

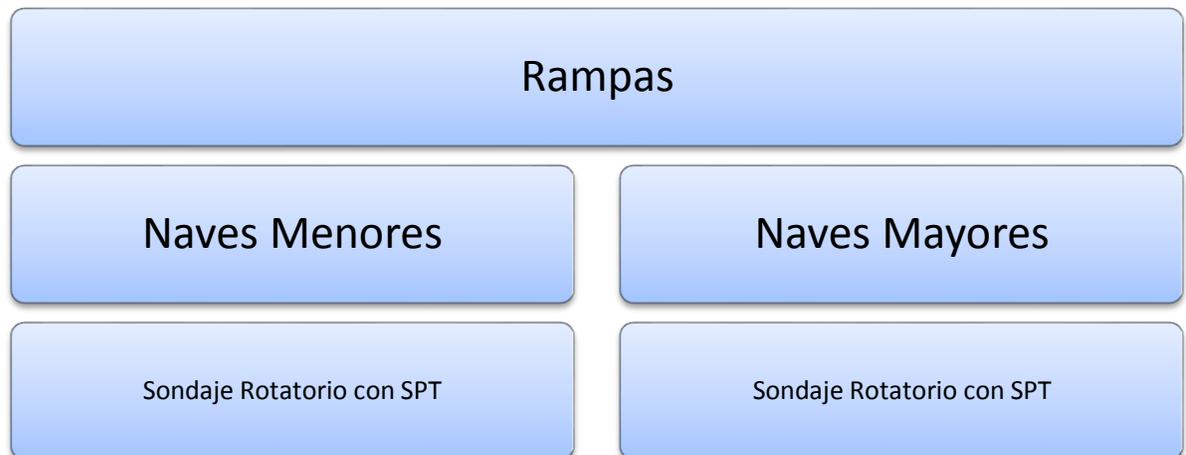


FIGURA 52. DIAGRAMA DE EXPLORACIÓN PARA RAMPAS. (FUENTE: DOP, 2013).

Estas prospecciones corresponden a las mínimas recomendadas para una etapa de ingeniería básica. La recomendación de la DOP es que en caso de ser necesario, se añadan más durante la ingeniería básica o en etapas posteriores. La responsabilidad de definir el número, ubicación y tipo de exploración recae en el ingeniero geotécnico a cargo.

Por otro lado, y según se pudo observar en la Tabla 12, en el ámbito internacional se puede notar que el ensayo más recurrente es el CPT, recomendado por todas las normativas y manuales estudiados, seguido del ensayo de Corte por Veleta, luego CPTU y en cuarto lugar SPT junto con presiómetro, siendo recomendados ambos sólo por 5 de las normativas estudiadas.

A pesar de que para el caso internacional no se tiene la división según tipología de obra, se aprecia una clara recurrencia del ensayo CPT, mientras que al observar la Figura

48, la Figura 49, la Figura 51 y la Figura 52 que la prospección más recomendada en la Guía DOP es el sondaje rotatorio con ensayo SPT.

Esta diferencia podría deberse a la mayor experiencia internacional en el desarrollo de obras portuarias, además de una mayor disposición de la maquinaria y plataformas necesarias para efectuar dichos ensayos. Además, según indica Urquiza (2007), en Chile sólo dos empresas cuentan con plataformas de tipo Jack Up, siendo una poseedora de 3 del total de 4 plataformas, esto dificulta la obtención de una de ellas para efectuar los ensayos pertinentes.

En cuanto a la exploración geofísica, en el extranjero es una práctica frecuente y la mayoría de los manuales y guías la recomiendan, mientras que en Chile, se puede observar menciones al respecto, pero en la práctica, y según se presentó en la sección 3.4, no se utilizan mucho, a excepción de cuando se busca conocer el fondo marino durante un proyecto (para estos casos se realiza y además debe llevar una certificación del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA)), o bien, según la Figura 48 y la Figura 51, para rompeolas de gravedad y muelles de penetración diseñados para naves mayores.

En relación con la toma de muestras, en la Guía DOP se refiere a las muestras superficiales de sedimentos mediante buzos especializados y mediante dragas. Esto no dista mucho de lo que se propone en los manuales internacionales, la diferencia radica en que en los últimos se detalla más respecto a la maquinaria implementada con estos fines.

Por otro lado, al referirse a la toma de muestras en profundidad, la Guía DOP sólo plantea, para el caso marítimo, muestras obtenidas con la cuchara SPT durante un sondaje rotatorio con SPT. Mientras que en las recomendaciones internacionales se pueden distinguir métodos que permiten obtenciones de muestras no alteradas, como los tubos Shelby y los doble o triple tubo.

5.2 PROPUESTA METODOLÓGICA DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS DE OBRAS MARÍTIMAS

La propuesta que se presenta en durante este trabajo se puede separar en dos áreas: la primera una propuesta de procedimientos, y la segunda, una propuesta de metodologías de exploración in-situ.

5.2.1 BASE DE DATOS NACIONAL.

Según se vio en la sección 3.2.1.1. los proyectos debiesen tener un estudio de gabinete inicial, con la finalidad de recopilar información para planificar y optimizar el trabajo de campo a realizar. Al tener información de la zona, previo a realizar la exploración, se puede enfocar el trabajo de campo en las zonas donde el suelo es más complejo, o bien, estimar mejor las profundidades de las prospecciones que se realizarán, o simplemente, enfocar la exploración en las zonas donde no se dispone información, y así obtener un panorama más completo de las propiedades del suelo donde se construirá.

Pero al buscar reunir la información existente de la zona a explorar y sectores aledaños, se presenta un problema. La mayoría de los documentos de exploraciones previas tienen un carácter privado, por lo que el acceso a los mismos resulta dificultoso y en ocasiones imposible.

Dentro de las labores de la DOP, y según lo definido en el Decreto D.S.MOP N°932 de 2008 y el DFL N°850 de 1997, se incluye lo siguiente:

“En el marco de las funciones que le competen a la Dirección de Obras Portuarias, establecidas... se fijan, entre otras, la responsabilidad por la supervigilancia, fiscalización y aprobación de los estudios, proyectos, construcciones, mejoramientos y ampliaciones de toda obra portuaria, marítima, fluvial o lacustre y del dragado de los puertos y de las vías de navegación que se efectúen por los órganos de la Administración del Estado, por entidades en que éste tenga participación o por particulares.”

Producto de lo anterior, la DOP recibe una serie de información proveniente de los proyectos que supervisan. Esta información está definida en el documento “Procedimiento de Ingreso y Aprobación de proyectos privados”, algunos de los cuales requieren certificación, otros no. Los documentos corresponden a los siguientes:

- Estudios Topográficos y Batimétricos (Requiere Certificación SHOA)
- Estudio de Marea (Requiere Certificación SHOA)
- Estudio Corrientes (Requiere Certificación SHOA)
- Estudio de Oleaje (Requiere Certificación SHOA)
- Estudio de Vientos (Requiere Certificación SHOA)
- Informe de Mecánica de Suelos
- Estudio de Dragado
- Estudio de Sedimentos
- Estudio de Maniobrabilidad (Aprobado por Autoridad Marítima Local o Dirección Técnica).

En base a esta necesidad de que exista información disponible para desarrollar un buen estudio de gabinete inicial, y a que la Dirección de Obras Portuarias recibe todos estos documentos para cada nuevo proyecto se propone la creación de una base de datos a nivel nacional, con la posibilidad de ser consultada en caso de nuevos proyectos en zonas vecinas. Esta base de datos debiera contener lo siguiente:

- Estudios Básicos (Topográficos, Batimétricos, Mareas, Corrientes, Oleaje y Vientos)
- Informes de Mecánica de Suelos
- Registro Fotográfico de Muestras

El contenido de los estudios básicos viene definidos por el SHOA, y al requerir su certificación se asegura que la información está en el documento. Por otro lado, el informe

de mecánica de suelos no posee certificación, y si bien las obras poseen cierta fiscalización, es necesario definir el personal que se encargará de dicho proceso.

Sería recomendable que esta base de datos, sea ordenada mediante un sistema de información geográfica (SIG o GIS), de este modo, facilitaría el uso por parte de los contratistas que requieran su empleo, creando una plataforma donde la información se encuentre más ordenada y sea más simple localizar los informes de utilidad.

Por último, es importante destacar, que deberá quedar establecido dentro de las licitaciones de estudios o ejecución de proyectos, que la información que se genera en cuanto a las temáticas de geotécnica marítima quedará posteriormente disponible para consultas de otros proyectos.

5.2.1.1 CONTENIDO DEL INFORME DE MECÁNICA DE SUELOS EN LA BASE DE DATOS.

El informe de mecánica de suelos debiese estar conformado por dos partes. La primera factual, donde se presentarán los resultados de ensayos y prospecciones, y la segunda, donde se encontrará la interpretación de los mismos, realizada por el profesional a cargo.

Dentro de la primera parte, correspondiente a los resultados obtenidos de la exploración, y de acuerdo a lo planteado por la Dirección de Obras Portuarias (MOP, 2013) debiesen presentarse al menos siguientes secciones:

- Las características de los equipos utilizados y su calibración, además de la metodología utilizada en la medición.
- Una ficha de registro de cada sondaje y/o calicata.
- Una planta del terreno, en la cual se ubiquen las prospecciones y sus cotas. Dichas cotas deberán estar referenciadas con las correspondientes al levantamiento topográfico, mientras que las que sean en agua deberán medirse a partir del NRS (Nivel de reducción de sonda)
- Las condiciones del entorno en la fecha de la prospección (Marea, oleaje, corrientes y viento).
- El perfil stratigráfico del suelo estudiado.
- Resultados de pruebas de campo.
- Resultados de ensayos de laboratorio.

Por otro lado, la parte de interpretación de resultados será distinta dependiendo de los ensayos efectuados, pero a modo general, debiese constar de los siguientes datos para un sondaje estándar:

- Una descripción geológica de la zona explorada.
- Antecedentes geotécnicos obtenidos durante la exploración.
- Parámetros de resistencia al corte
- Clasificación sísmica del suelo

Es importante notar que dentro de los datos entregados a la base de datos, no será necesario incluir los valores de parámetros de diseño utilizados, de este modo se forzará a la revisión de la información por un ingeniero civil para el diseño de nueva infraestructura, evitando así malas prácticas. En caso de ser incluidas las recomendaciones de diseño tendrán un carácter únicamente referencial, siendo el profesional responsable el encargado del establecimiento de los parámetros de diseño propios.

La clasificación sísmica del suelo a considerar, si bien existe una específica para obras industriales marítimas del tipo muelle transparente en la norma en consulta pública NCh 2369, debiese corresponder a la dictada por la norma NCh 433. Of1996 Modificada en 2012, pues de este modo se incluirían las experiencias más recientes en el área sísmica.

5.2.1.2 SUPERVISIÓN DE LA EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA (PERFORACIÓN DE SONDAJES Y ENSAYOS IN SITU).

Considerando que los valores obtenidos de los ensayos, como por ejemplo, el valor N del ensayo SPT, son muy susceptibles a su metodología de desarrollo, es de suma importancia que exista una supervisión durante el proceso la cual deberá ser realizada por profesionales capacitados para esta labor. Así, se podrán validar las mediciones de los ensayos en terreno, además de poder realizar cambios en las profundidades y ubicaciones de las exploraciones según los resultados de las prospecciones.

Además, ya que los datos y la información obtenida de las exploraciones geotécnicas podrán ser revisadas y utilizada por nuevos proyectos, cobra aún mayor importancia que exista una supervisión de las mismas.

El profesional designado para vigilar el proceso debería cumplir al menos una de las siguientes exigencias:

- 1) Ingeniero Civil o similar con capacitación demostrable en estudios geotécnicos (grado de diplomado o magister en el área de mecánica de suelos).
- 2) Para proyectos de naves menores: Ingeniero Civil o similar, con al menos 2 años de experiencia demostrable en campañas de prospecciones marítimas geotécnicas.
- 3) Para proyectos de naves mayores: Ingeniero Civil o similar, con al menos 5 años de experiencia demostrable en campañas de prospecciones marítimas geotécnicas.

5.2.2 ADICIÓN Y CAMBIOS DE METODOLOGÍAS DE EXPLORACIÓN IN-SITU.

Dentro de este trabajo, el contratista Fugro presentó un ensayo relativamente nuevo, llamado Reflexión de Ultra Alta Resolución (Reflexión UHR). Este ensayo tiene como beneficio que permite explorar profundidades de hasta 500 metros por debajo del fondo marino. El resultado de la exploración permite conocer la distribución de los estratos previo a una exploración invasiva.

Al ser una metodología de reflexión, no se presentan problemas en caso de haber capas densas intercaladas en estratos más blandos, a diferencia de la refracción que posee esa limitante. Al compararla con otros métodos de reflexión, como los de alta resolución (Sub Bottom Profiler), la diferencia radica en certeza en los estratos encontrados en el sub suelo, pues la frecuencia utilizada por el UHR permite mayor resolución en los resultados.

En la Figura 53 se presentan los estratos observados luego de un estudio de Reflexión UHR, en rojo se observa la distribución de los sondajes seleccionada para optimizar la exploración invasiva.

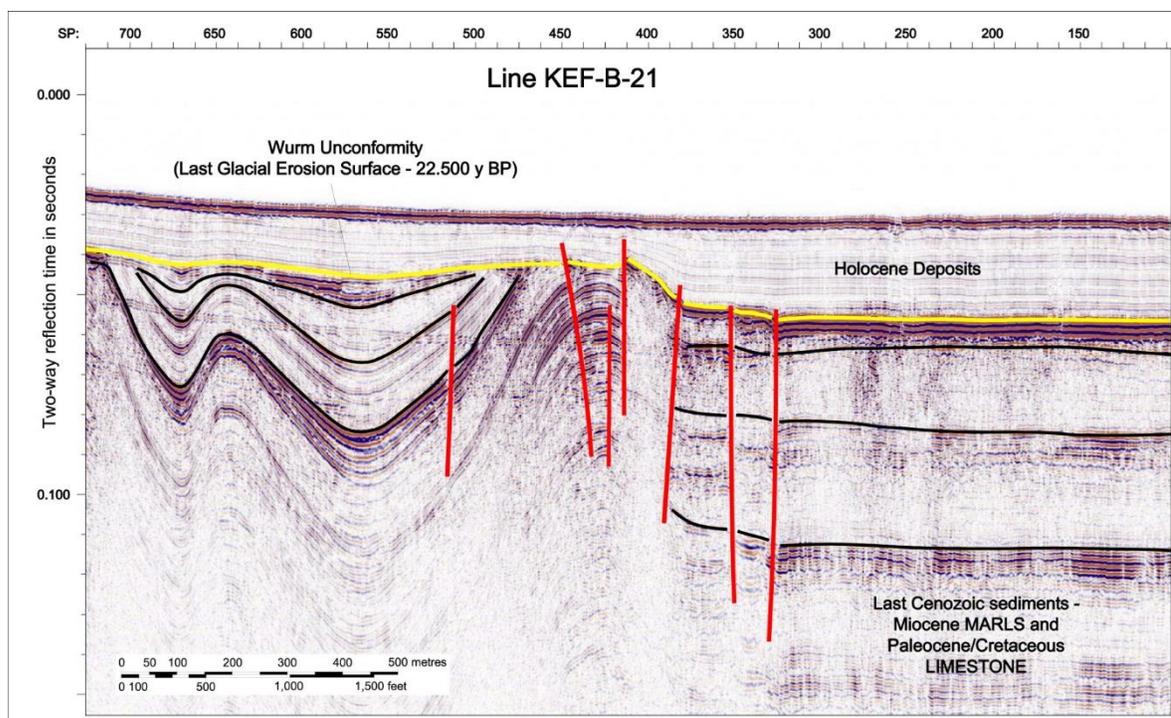


FIGURA 53. RESULTADOS DE UN ENSAYO DE REFLEXIÓN UHR (FUENTE: IMAGEN FACILITADA POR FUGRO CHILE).

Por lo motivos mencionados, este ensayo será recomendado para ciertas tipologías.

En las siguientes figuras (Figura 54 a Figura 58) se presentan las mejores metodológicas propuestas, se adjuntan los diagramas según tipología de obras, incluyendo los ensayos propuestos y los cambios de metodologías. En azul, se pueden

observar las prospecciones propuestas por la Guía DOP, y en rojo, las mejoras propuestas en el presente trabajo de título. Adicionalmente, se podrá observar algunas prospecciones con una equis (X), lo que indicará que esa prospección no se recomienda y que se propone una mejora de la misma. Este cambio de método de prospección por una mejora se encuentra en dos metodologías: En el cambio de sondajes rotatorios con SPT por exploración mediante CPTU, y en cambio de sondaje geofísico por Reflexión UHR. Los beneficios asociados a la Reflexión UHR fueron presentados al inicio de esta sección.

El reemplazo de sondajes rotatorios con SPT por la prospección CPTU tiene su origen en lo que se observó a nivel internacional, pues este último era recomendado más ampliamente que el sondaje rotatorio, y la información respecto a las propiedades del suelo obtenidas eran mayores, pues se obtiene información respecto a la presión de poros además de obtenerse perfiles continuos.

También se propone, que en los casos donde el sondaje rotatorio con SPT continúe, se añada una geofísica de pozo PS Logging. Esta propuesta viene dada por lo observado en las exploraciones más recientes, si bien involucra un costo en tiempo y en implementos adicionales, aprovecha el sondaje ya excavado y brinda información respecto a las velocidades de ondas de corte y compresión en los distintos estratos del suelo.

Además, se propone incluir una nueva división, separar las obras como obras abrigadas y obras en mar abierto. Esta división surge debido a que en aguas abrigadas las condiciones ambientales a las que se somete la plataforma que se utilizará para la investigación son más calmas, de manera que los requisitos de las plataformas serán distintos.

Para ciertas tipologías, se propondrán distintas prospecciones en función de si existe información previa de la zona explorada. En caso de que en la exploración previa no se hayan incluido las prospecciones mencionadas como “Sin estudios previos”, la zona evaluada se considerará como “Sin estudios previos”.

A continuación se presentan los diagramas con las recomendaciones:

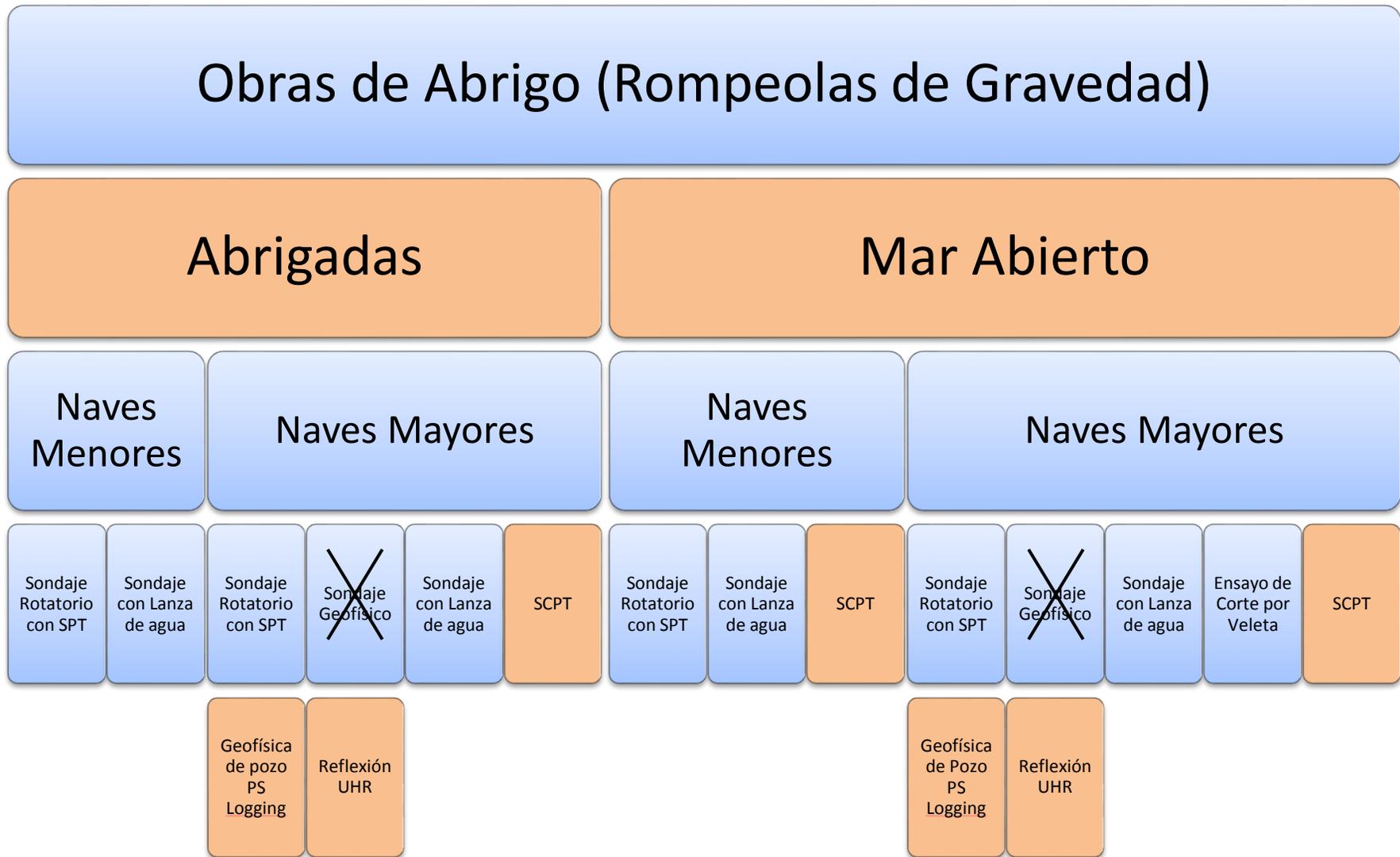


FIGURA 54. DIAGRAMA DE EXPLORACIÓN PROPUESTA PARA OBRAS DE ABRIGO (ROMPEOLAS DE GRAVEDAD). (FUENTE: MODIFICADO DE MOP, 2013).

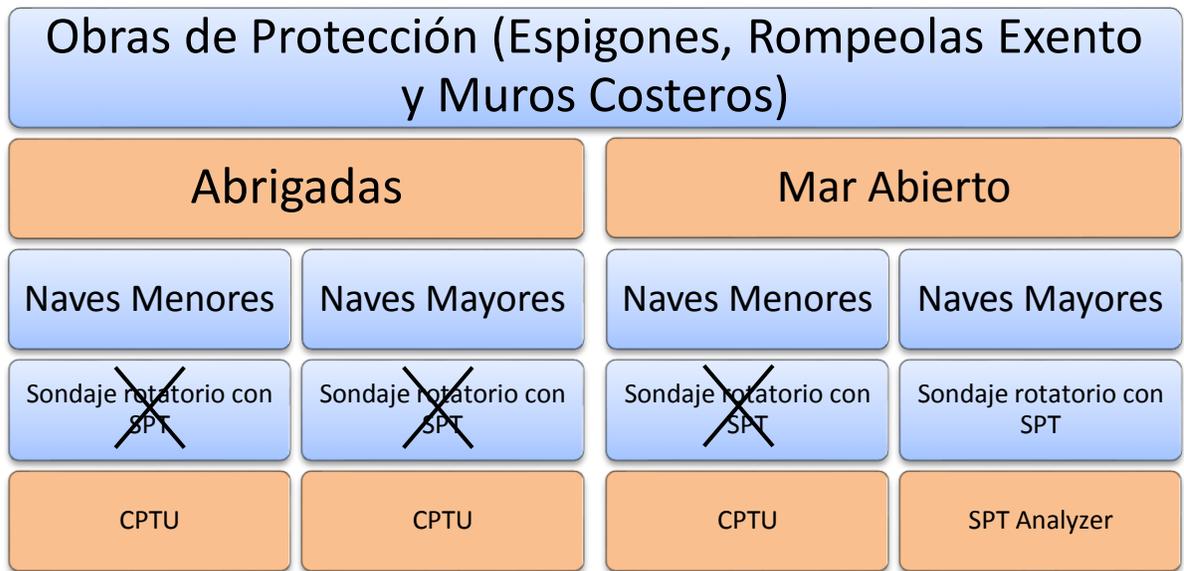


FIGURA 55. DIAGRAMA DE EXPLORACIÓN PROPUESTA PARA OBRAS DE PROTECCIÓN (ESPIGONES, ROMPEOLAS EXENTO Y MUROS COSTEROS). (FUENTE: MODIFICADO DE MOP, 2013).

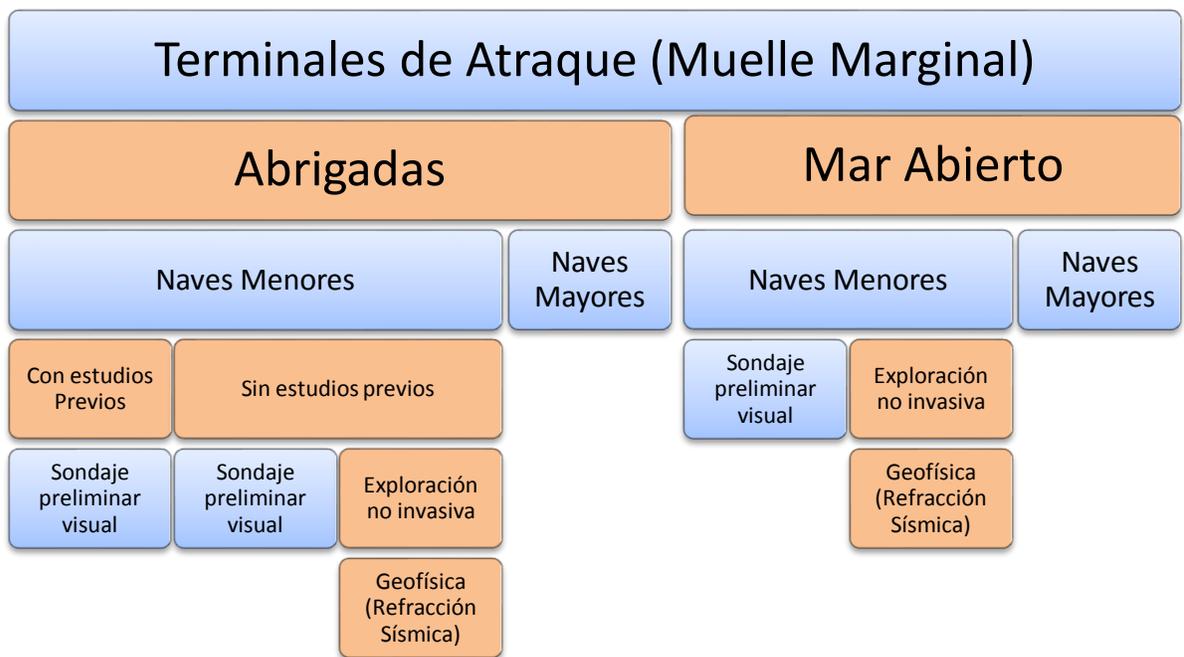


FIGURA 56. DIAGRAMA DE EXPLORACIÓN PROPUESTA PARA TERMINALES DE ATRAQUE (MUELLE MARGINAL). (FUENTE: MODIFICADO DE MOP, 2013).

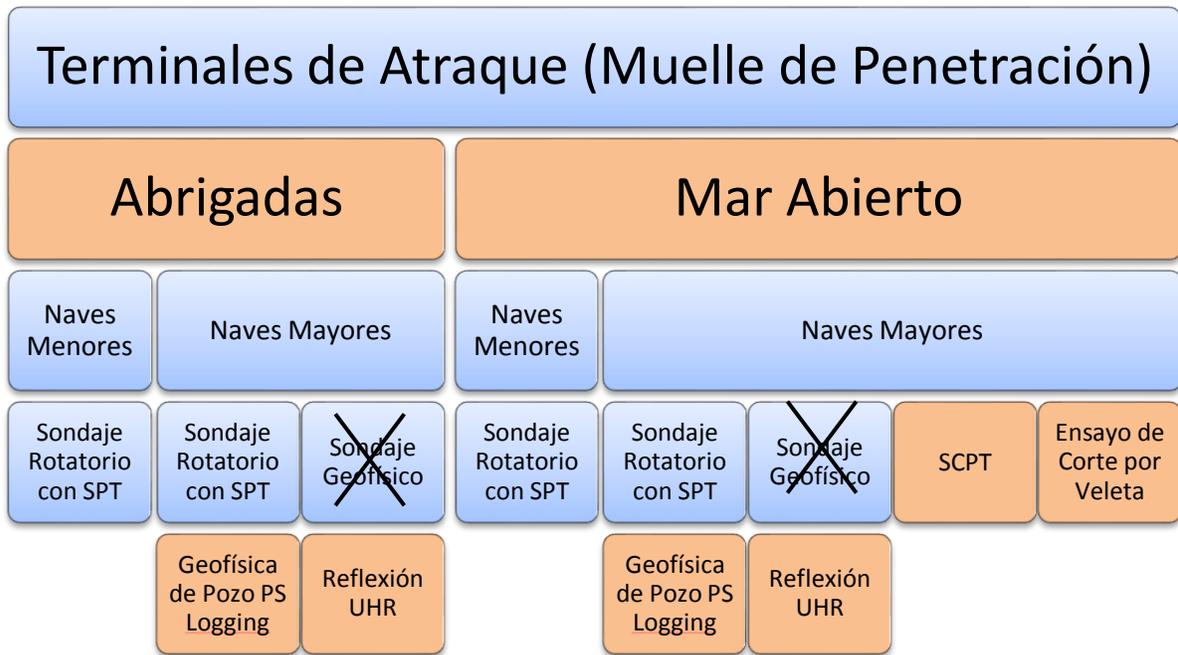


FIGURA 57. DIAGRAMA DE EXPLORACIÓN PROPUESTA PARA TERMINALES DE ATRAQUE (MUELLE DE PENETRACIÓN). (FUENTE: MODIFICADO DE MOP, 2013).

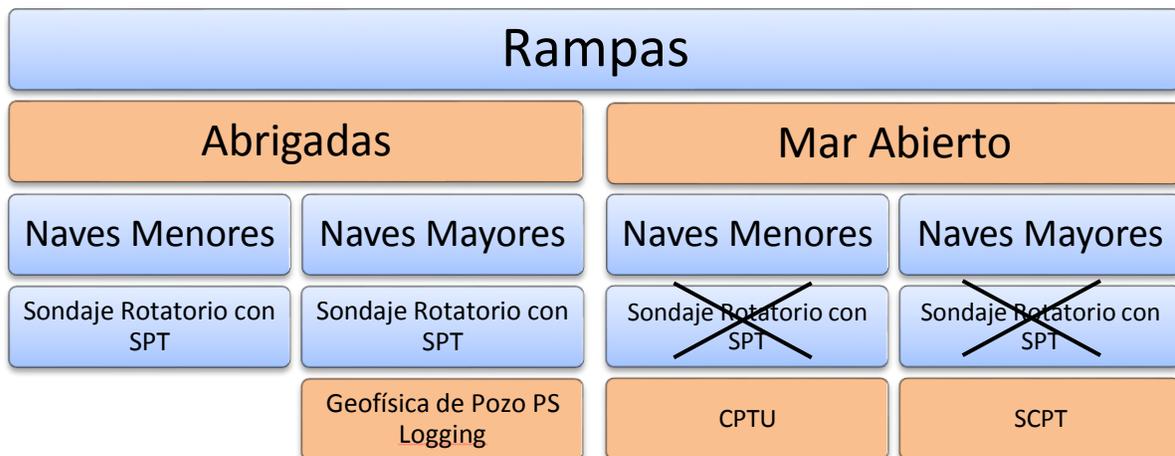


FIGURA 58. DIAGRAMA DE EXPLORACIÓN PROPUESTA PARA RAMPAS. (FUENTE: MODIFICADO DE MOP, 2013).

5.2.3 RECOMENDACIONES ADICIONALES.

Si bien lo presentado anteriormente debiese conformar las exigencias y/o recomendaciones para la exploración geotécnica marítima, existen algunas consideraciones adicionales que se debiesen incluir:

5.2.3.1 Toma de Muestras con tubos Shelby

Cuando se busca realizar un ensayo en laboratorio, para que este resultado sea representativo del suelo explorado es necesario que la muestra esté lo menos alterada posible, o bien, conocer las propiedades a través de ensayos in-situ de manera de poder replicar las condiciones naturales del suelo.

Al explorar el fondo marino, no es factible conseguir las propiedades de estructura necesarias para remodelar la muestra, como por ejemplo, su compacidad y consolidación. Es por esto que la toma de muestras inalteradas cobra vital importancia. Las muestras tomadas con tubos Shelby, también conocidos como tubos de pared delgada son capaces de entregar muestras relativamente inalteradas; este muestreador se puede utilizar en todos los tipos de suelos, exceptuando en gravas, bolones o rocas y su uso está definido por la norma ASTM D1587-15.

5.2.3.2 Ensayos Presiómetro

Existen ciertos proyectos que por sus características propias, poseen una baja tolerancia a las deformaciones, por ejemplo, muelles con grandes grúas o terminales de gas licuado. En este tipo de construcciones deformaciones pueden generar grandes pérdidas en términos de la maquinaria utilizada o del producto que se transporta. Es por esto, que se recomienda intercalar ensayos de presiómetro con los CPTU o con los SCPT hasta la profundidad de empotramiento del pilote. De este modo, se podrá obtener el módulo elástico del suelo (E), y calcular de mejor manera los asentamientos de las fundaciones.

5.2.3.3 SPT Analyzer

Según dicta la norma NCH 3364:2014 “Todo sistema o equipo utilizado para ejecutar el ensayo de penetración estándar, orientado a evaluar el potencial de licuación, debe poseer la documentación respectiva que indique el porcentaje de energía (ERi) que éste está aplicando respecto de la energía teórica nominal medidos en la cabeza de golpe.” (p.13), a pesar de lo anterior, muchos de los estudios revisados no cuentan con esa información.

Además del porcentaje de energía (ERi) existe una metodología para la medición de energía durante los ensayos SPT (SPT Analyzer), la cual permite relacionar los valores de N con la cantidad de energía aplicada, permitiendo que la normalización del N-value no queda sujeta a correlaciones ni a números medidos por el operador, si no que se tiene el detalle, de manera continua, de la energía liberada durante el proceso. Al contar con esta información, el ensayo es más repetible, puesto que se conoce de manera precisa los datos, y del mismo modo, los cálculos que posteriormente entregan el potencial de licuación son más certeros. A pesar de todo lo anterior, esta metodología no es muy comúnmente utilizada en Chile.

6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE FACTIBILIDAD DE PROPUESTA DE PROSPECCIONES

En el presente capítulo se busca analizar la factibilidad de la aplicación en Chile de la propuesta de exploración geotécnica presentada en el capítulo anterior. Este estudio de factibilidad se realizará analizando los tipos de suelo frecuentemente encontrados en Chile. También se incluirá un análisis de los costos asociados a la implementación de la metodología propuesta.

6.1 FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LA PROPUESTA

Como se indicó en la sección 3.4, el tipo de suelo observado en las costas Chilenas a profundidades menores de 50 metros corresponde a arenas finas a medias o bien, arcillas limosas. En función de estos suelos observados aparecen ciertas dificultades con respecto a los ensayos recomendados.

El ensayo CPT (válido también para CPTU o SCPT) tiene una gran ventaja, y es que puede ser utilizado en gran parte de los tipos de suelos, desde arcillas blandas y limos; pero no es útil en gravas, bolones o rocas. Dado lo anterior, no representaría un problema su implementación en las costas Chilenas.

Un beneficio que tiene el ensayo CPT por sobre la exploración mediante SPT es que los datos obtenidos son repetibles, pues en esa prospección se realiza con una penetración a velocidad fija, mientras que los obtenidos por SPT dependen en gran medida de cómo se realizó el ensayo, pues la energía asociada a cada golpe no es necesariamente la misma. Es por esto, que en el ensayo SPT se pueden obtener resultados diferentes para los mismos suelos.

En adición a lo anterior, la realización de exploración por medio de CPT o CPTU tiene una velocidad aproximada de 2 cm/seg, lo que permite explorar grandes profundidades en poco tiempo en comparación con el SPT, ya que para la realización de este último, se debe excavar previamente el sondaje, intercalando el ensayo en ciertos tramos.

Por último, es importante destacar que la exploración mediante CPT, CPTU o SCPT entrega como resultado un perfil continuo del suelo, a diferencia de la realización de un sondaje rotatorio con ensayos SPR, que entrega resultados puntuales de las zonas donde se efectúe el ensayo.

En cuanto a la plataforma necesaria para llevar a cabo el ensayo, se pueden observar diferencias entre las prospecciones mediante cono de penetración y el sondaje rotatorio con ensayo SPT. Las exploraciones CPT, CPTU y SCPT requieren para desarrollarse una plataforma tipo Jack up, debido a que necesitan mayor rechazo por parte de la misma, una plataforma flotante no le otorga la suficiente resistencia. Por otro lado, la exploración con sondaje rotatorio y ensayos SPT se puede efectuar desde plataformas flotantes tipo balsas sin problemas. Las plataformas tipo Jack Up pueden operar en distintas condiciones, variando únicamente el costo asociado a ellas, es por

esto que es válido decir que independiente de la profundidad, las prospecciones realizadas con cono de penetración se pueden efectuar en las condiciones encontradas en Chile.

Por todo lo ya mencionado, el ensayo CPT, CPTU o SCPT se podrían desarrollar sin mayores problemas en la costa Chilena, y representan una mejora frente a la exploración realizada con sondaje rotatorio con ensayos SPT, pues la información obtenida respecto a las propiedades del suelo es más completa..

El ensayo de corte por veleta, es usado a nivel internacional, su uso data de los años 1940 a 1950 (Ladd *et al.*,1977), y mediante él, se estudia de suelos finos. De hecho, cómo se indicó en la sección 3.4, existen ingenieros que sólo fomentan su uso en arcillas. Estas restricciones provienen de que durante el ensayo, se busca medir el comportamiento no drenado del suelo mediante la rotación de un sistema de placas, que rota a 0,017 rpm (ASTM D 2573, 2008). Esto representa un problema para los suelos chilenos, pues en las costas chilenas se observan principalmente arenas finas, y en menor medida, arcillas.

Sin embargo, estudios más recientes, desarrollados por IDIEM (Olguín y Ortúzar, 2015) desarrollaron e implementaron una veleta que permite su uso a velocidades cercanas a 100 rpm. Estas velocidades permiten cerciorar el comportamiento no drenado en suelos del tipo arenas finas limosas. Si bien son estudios relativamente recientes, y se probaron en lamas de relave, se esperara el mismo comportamiento en suelos de similares características. Por lo tanto, siempre que exista evidencia de arenas finas, o arenas finas limosas el ensayo se podría llevar a cabo con el equipo equivalente desarrollado por IDIEM.

6.2 ANÁLISIS ECONÓMICO

Mediante de conversaciones con contratistas y consultores de ingeniería, sumado a la revisión de algunos proyectos en la página web de Mercado Público, se obtuvo una serie de precios de referencia para los ensayos y prospecciones propuestos, los cuales fueron sometidos a algunas conversiones, debido a la variabilidad de unidades obtenidas. Para estas conversiones se utilizaron los siguientes valores:

- Unidad de Fomento (UF) = \$26.500 CLP
- Dólar (USD) = \$700 CLP

En función de las conversiones, y llevando a metros lineales, días o kilómetros los valores obtenidos para ciertos estudios realizados, se obtuvo los precios presentados a continuación (Tabla 13). Es importante considerar, que al obtenerse datos de estudios en particular, los valores no son exactos, si no que se obtiene rangos. Además, el valor de los sondajes rotatorios incluye el costo asociado a la plataforma en la cual se realiza, a diferencia de los costos para ensayos del tipo CPTU o SCPT, los cuales no incluyen la plataforma, por lo que será necesario considerarla a parte.

Se añadieron también los costos para los ensayos de corte directo en laboratorio, pues se propuso incluir el ensayo de corte por veleta, in situ, y se buscará comparar los costos de la obtención del parámetro del suelo en laboratorio y en terreno.

TABLA 13. PRECIOS UNITARIOS DE ENSAYOS EN UNIDAD DE FOMENTO (UF)

		Rango de Precios		Unidad
Ensayos	CPTU (*)	4,9	7,9	UF/m
	SCPT (*)	5,7	8,7	UF/m
	PS Logging (*)	5,7	8,7	UF/m
	Reflexión UHR	-	577,8	UF/km
	SPT	1,2	3,0	c/u
	Corte por Veleta	20,8	26,4	c/u
	Corte Directo (**)	11,5	71,5	c/u
	SPT Analyzer	-	4,0	UF/día
Equipo o herramientas	Sondaje Rotatorio	11,3	26,4	UF/m
	Plataformas Jack Up	528,3	1320,8	UF/día
(*) : Los costos de estos ensayos no consideran la plataforma sobre la cual se realizan.				
(**) : Se considera un mínimo de 3 muestras por punto.				

La gran diferencia en los costos asociados a plataformas de tipo Jack Up, se debe a la variedad de columnas de agua en las cuales se realiza el estudio. Para explorar una zona con columnas de agua cercanas a los 30 metros se requerirá una plataforma de tamaño considerablemente mayor, pues el largo de las patas de la misma debe ser varios metros superior. Además, deben poseer mayor firmeza para evitar el pandeo producto de las corrientes y oleaje. Por otro lado, al explorar zonas de columnas de agua menores, el tamaño de la plataforma puede ser menor.

La diferencia de costos presentados para el corte directo en la Tabla 13 se debe a las distintas probetas ensayadas. Por ejemplo, el menor valor corresponde a un ensayo de corte directo realizado a 3 probetas de 5x5 cms, a cargas normales de 2,5 kg/cm²; mientras que el valor más alto se da para las mismas probetas, con un suelo de alta plasticidad o arcilloso.

Para comparar los costos asociados a la exploración marítima mediante distintas tecnologías se utilizó el supuesto de que se requiere explorar 30 metros de subsuelo, para una columna de agua de 10 metros y para una de 30 metros. Los valores obtenidos se presentan a continuación.

TABLA 14. COMPARACIÓN DE COSTOS APROXIMADOS EN UNIDADES DE FOMENTO (UF) PARA DISTINTAS METODOLOGÍAS DE EXPLORACIÓN, SUPONIENDO UN SONDAJE DE 30 METROS DE PROFUNDIDAD, A DISTINTAS COLUMNAS DE AGUA.

	Columna de agua de 10 metros		Columna de agua de 30 metros	
	Rango de Precios		Rango de Precios	
Sondaje Rotatorio con SPT cada 1 metro	376 UF	829 UF	376 UF	829 UF
Sondaje Rotatorio con SPT cada 1 metro y PS Logging	546 UF	1089 UF	546 UF	1090 UF
Sondaje Rotatorio con Corte por Veleta cada 3 metros	547 UF	1057 UF	548 UF	1057 UF
Sondaje Rotatorio con toma de muestras cada 3 metros con corte directo en laboratorio	454 UF	1055 UF	455 UF	1055 UF
CPTU	676 UF	766 UF	1468 UF	1559 UF
SCPT	698 UF	789 UF	1491 UF	1581 UF
Nota: Estos costos no consideran los costos asociados a la movilización de la maquinaria				

En la Tabla 14 se buscó comparar lo siguiente:

- Las metodologías de exploración con sondaje rotatorio, con y sin medición de velocidad de ondas de corte.
- Las metodologías asociadas a cono de penetración (CPTU y SCPT).
- Las exploraciones con sondaje rotatorio versus las con cono de penetración.
- Costos en un sondaje rotatorio con medición de resistencia al corte in-situ versus toma de muestras y ensayos de corte en laboratorio.

Al comparar la exploración mediante sondaje rotatorio con y sin ensayo de PS Logging se observan costos de entre un 31% y un 45% mayores al agregar el ensayo. Este incremento corresponde a que se debe revestir el sondaje realizado, y pasar una nueva sonda que genera y mide las ondas sísmicas en el mismo. Los valores obtenidos al variar la columna de agua se mantienen, pues los rangos de precios de los sondajes rotatorios incluyen la plataforma utilizada, y al ser flotante, puede explorar a mayor profundidad de agua sin necesidad de mejorar la plataforma.

En cuanto a la exploración realizada con ensayos de penetración de cono, los costos asociados a añadir la medición de ondas de corte varían entre un 1,4 y un 1,5% para columnas de agua cercanas a los 30 metros y un 2,9 y un 3,3% para columnas de agua de 10 metros. Por lo tanto, dependiendo del proyecto, el coste adicional no representa grandes cambios en comparación con la información adicional del suelo obtenida.

Si se observa el límite superior del rango, al comparar bajo una columna de agua de 10 metros un sondaje rotatorio con SPT y un CPTU se observa un costo del 8,2% menor para el ensayo CPTU. Por otro lado, al considerar la adición de medición de ondas

sísmicas para los mismos ensayos en las mismas condiciones el costo observado es 38,1% menor para el ensayo SCPT.

Sin embargo, para la columna de agua de 30 metros, la variación de costos, en el rango máximo entre sondajes rotatorios y penetración de cono, con y sin medición de ondas de corte se obtienen costos de entre un 45% y un 88% mayores al implementar los ensayos de penetración de cono.

En cuanto a la medición de resistencia al corte del suelo, primero se debe tener en consideración que para que el ensayo en laboratorio tenga validez, se deberán tomar 3 muestras por punto. En función de esto, y habiendo calculado los costos se puede observar que, en caso de ser un suelo de alta plasticidad el ensayado, el costo de ensayar las muestras en laboratorio es un 0,2% más económico que ensayar in-situ. Mientras que para un suelo arenoso, en una probeta tipo de 5x5 cms, la toma de muestras, sumada a su ensayo en laboratorio resulta un 20,2% más económico que la realización de un ensayo de corte por veleta en terreno.

A continuación, se presenta una tabla a modo de resumen de la variación porcentual de los costos.

TABLA 15. TABLA RESUMEN DE LA VARIACIÓN PORCENTUAL AL COMPARAR PROSPECCIÓN DE MENOR VALOR CON PROSPECCIÓN DE MAYOR VALOR.

n°	Comparación entre		Aumento porcentual (Rangos de aumento) [%]
	Prospección de Menor Valor	Prospección de Mayor Valor	
1	Sondaje Rotatorio con SPT cada 1 metro	Sondaje Rotatorio con SPT cada 1 metro y PS Logging	31% - 45%
2	CPTU con columna de agua de 10 metros	SCPT con columna de agua de 10 metros	2,9% - 3,3%
3	CPTU con columna de agua de 30 metros	SCPT con columna de agua de 30 metros	1,4% - 1,5%
4	Sondaje Rotatorio con SPT cada 1 metro	CPTU con columna de agua de 10 metros (Límite inferior)	79,70%
5	CPTU con columna de agua de 10 metros (Límite superior)	Sondaje Rotatorio con SPT cada 1 metro	8,20%
6	Sondaje Rotatorio con SPT cada 1 metro y PS Logging	SCPT con columna de agua de 10 metros (límite Inferior)	27,90%
7	SCPT con columna de agua de 10 metros (límite Superior)	Sondaje Rotatorio con SPT cada 1 metro y PS Logging	38,10%
8	Sondaje Rotatorio con SPT cada 1 metro	CPTU con columna de agua de 30 metros (Límite Inferior)	290%
9	CPTU con columna de agua de 30 metros (Límite Superior)	Sondaje Rotatorio con SPT cada 1 metro	173%
10	Sondaje Rotatorio con SPT cada 1 metro y PS Logging	SCPT con columna de agua de 30 metros (Límite Inferior)	88,10%

TABLA 16. TABLA RESUMEN DE LA VARIACIÓN PORCENTUAL AL COMPARAR PROSPECCIÓN DE MENOR VALOR CON PROSPECCIÓN DE MAYOR VALOR (CONTINUACIÓN).

11	SCPT con columna de agua de 30 metros (Límite Superior)	Sondaje Rotatorio con SPT cada 1 metro y PS Logging	45,20%
12	Sondaje Rotatorio con toma de muestras cada 3 metros para corte directo	Sondaje Rotatorio con Corte por Veleta cada 3 metros	0,2% - 20,2%

6.2.1 CASO DE ESTUDIO

Con el objetivo de estudiar los costos de la metodología propuesta, y la consecuencia de esta variación en el porcentaje de incidencia de la campaña geotécnica en el costo de la obra se seleccionó un proyecto, del cual se conocían sus antecedentes a través de la plataforma Mercado Público, sumados a los resultados de un trabajo académico realizado por alumnos del diplomado de “Mecánica de Suelos Aplicada” de la Universidad de Chile.

El proyecto Puerto Cisnes es un proyecto desarrollado durante el año 2015 en la localidad del mismo nombre. Puerto Cisnes se ubica en la provincia de Aysén, XI Región, en el canal de Puyuhuapi frente a la isla Magdalena. En la Figura 59 se observa la ubicación de la zona de estudio.

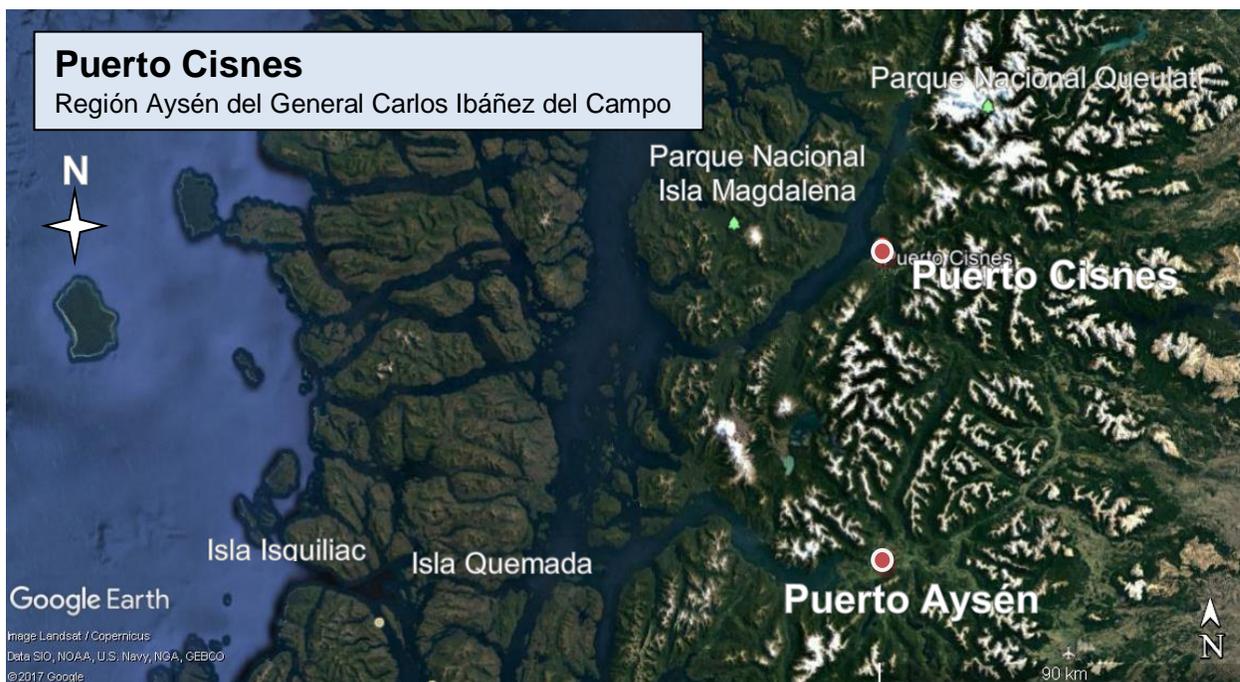


FIGURA 59. UBICACIÓN GENERAL DEL PROYECTO (FUENTE: MODIFICADO DE GOOGLE EARTH)

El objetivo del proyecto fue en la reposición de rampas en la zona, y contempló la construcción de un puente de acceso, un sistema de pasarela basculante y de pontones estabilizados mediante pilotes guías (Trabajo académico de diplomado “Mecánica de Suelos Aplicada”, 2016). Durante la campaña geotécnica se realizaron: 4 calicatas, 2

sondajes terrestres y 5 sondajes marítimos, alcanzándose un costo total de la campaña de \$92 millones de pesos chilenos.

Es importante notar, que si bien se realizó una campaña geotécnica, esta no resultó lo suficientemente extensa. Al construir las columnas y pilotes, no se logró alcanzar el rechazo en la profundidad indicada en el estudio del proyecto, es por eso que fue necesario construirlas de mayor extensión a lo presupuestado, generándose un aumento del costo del proyecto de un 28,7% (Trabajo académico de diplomado “Mecánica de Suelos Aplicada”, 2016).

En la siguiente tabla, se presenta un resumen del detalle de los costos asociados al proyecto Puerto Cisnes:

TABLA 17. COSTOS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN Y LA CAMPAÑA GEOTÉCNICA DEL PROYECTO PUERTO CISNE (FUENTE: TRABAJO ACADÉMICO DE DIPLOMADO “MECÁNICA DE SUELOS APLICADA”, 2016)

	Valor en Unidades de Fomento [UF]
Presupuesto de Construcción de Obra Inicial	87.794
Monto Pagado en Construcción de Obra Final	113.019
Campaña Geotécnica	3.485
Sondajes Marinos con SPT: 3 Sondajes de 15 metros y 2 de 35 metros	1.245
Calicatas, Sondajes Terrestres Ensayos de laboratorio, informe geotécnico y otros	2.226

Una vez conocido el monto gastado en sondajes marinos y las profundidades exploradas se buscó evaluar los costos asociados al mismo proyecto, pero aplicando la metodología propuesta en este trabajo de título. Según la metodología propuesta, para una rampa en una zona abrigada con naves mayores correspondería realizar una exploración con SPT + PS Logging.

Adicionalmente se evaluaron los costos asociados a una exploración mediante CPTU, a pesar de que esta metodología fue recomendada para mar abierto y naves menores. Esta evaluación se llevó a cabo sólo con el objetivo de comparar los costos asociados y corroborar que su no inclusión en la propuesta para zonas abrigadas debido a su costo en equipamiento es justificado.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

**TABLA 18. PRESUPUESTO PARA EL PROYECTO PUERTO CISNES MEDIANTE LA METODOLOGÍA
PROPUESTA EN ESTE TRABAJO DE TÍTULO.**

Exploración Mediante	CPTU [UF]		SPT + PS Logging [UF]		Caso Ejecutado Originalmente (Solo SPT) [UF]
	Rango de Precios		Rango de Precios		
Sondaje 15 metros	602	1.440	247	293	162
Sondaje 35 metros	700	1.598	577	683	683
Total en Sondajes (3 de 15 metros y 2 de 35 metros)	3.206	7.515	1.896	2.243	1.245
% del proyecto en sondajes	2,8	6,6	1,7	2	1,1
Total en Campaña Geotécnica (Exploración Marítima, Terrestre y Ensayos de Laboratorio)	5.432	9.742	4.123	4.470	3.472
% del proyecto en geotécnica	4,8	8,6	3,6	4	3,1

En la Tabla 18 se puede notar que en el proyecto original, y considerando como el valor del proyecto lo invertido luego de ampliar la exploración, la campaña geotécnica tenía un porcentaje de incidencia del 3,1%, mientras que el valor de los sondajes marítimos para la misma representaba el 1,1%. Por otro lado, con los ensayos propuestos, se observan porcentajes de incidencia bastante mayores, para el ensayo CPTU el porcentaje de incidencia de la campaña geotécnica va entre un 4,8% y un 8,6%, mientras que si los sondajes rotatorios con ensayos SPT realizados hubiesen sido complementados con ensayos PS Logging, el porcentaje de incidencia de la campaña geotécnica hubiese estado entre un 3,6% y un 4%.

Considerando lo anterior se puede notar que la inversión en geotecnia con las metodologías planteadas en este trabajo representa un costo mayor al utilizado en la actualidad, pero también se pudo ver anteriormente (en la Tabla 17) que el costo final del proyecto resultó un 28,7% mayor a lo presupuestado.

Este proyecto, tenía un problema en su concepción, pues desde el inicio se sobreestimaron las propiedades del suelo, lo que llevó a que se tuvo que realizar una inversión mayor en la construcción. Aquí cobra especial importancia lo propuesto en la sección 5.2.1 respecto a la base de datos Nacional, pues el proyecto consistía en una reposición de infraestructura, por lo que debe haber existido un estudio previo relacionado con la infraestructura original. Es posible que de haberse realizado un buen estudio de gabinete, los costos del proyecto no se hubiesen elevado.

Si el desconocimiento de la zona de estudio es tan alto, como lo fue en este proyecto, se debería plantear la opción de realizar un estudio geofísico no invasivo (geofísica de reflexión UHR u otro), con el objetivo de evitar estos incrementos debidos a una mala estimación del suelo.

Dado lo anterior, y asumiendo que con las metodologías planteadas se evitarían las incertidumbres que se generan al utilizar únicamente ensayos SPT en un sondaje se comparó el costo inicial de la obra y su campaña geotécnica con el costo asociado al presupuesto inicial de la obra sumado a las campañas geotécnicas evaluadas:

TABLA 19. COMPARACIÓN DE COSTOS TOTALES DEL PROYECTO CON LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA.

	Monto Estimado [UF]	
Costo Obra Inicial + Campaña de Geotecnia original	87.794,51	
Costo Obra inicial + Campaña de Geotecnia propuesta con exploración mediante CPTU	87.794,67	87.794,83
Costo Obra inicial + Campaña de Geotecnia propuesta con exploración mediante CPTU y PS Logging	87.794,62	87.794,63

En función de lo observado en la Tabla 19, y sin considerar que producto de estimación equivocada de las profundidades de estudio se tuvo que invertir un monto mayor en infraestructura del planeado, se puede decir que de utilizar las metodologías propuestas en este trabajo, los costos finales del proyecto se mantendrían dentro de los mismos ordenes de magnitud. Por lo tanto, realizar una campaña geotécnica más exhaustiva, no significará una mayor inversión en el proyecto, pero sí reducirá incertidumbres, permitiendo un diseño de la estructura menos sobredimensionado, con menos materiales pero igualmente funcional que el planteado originalmente.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se busca concluir respecto a la metodología propuesta, y establecer ciertas recomendaciones para futuros estudios geotécnicos de obras marítimas.

7.1 CONCLUSIONES

En la actualidad, la metodología de exploración geotécnica marítima más utilizada en Chile consiste en sondajes rotatorios con ensayos SPT cada 1 metro de profundidad. Por otro lado, a nivel internacional, la exploración geotécnica se realiza mayoritariamente mediante ensayos CPT (100% de los documentos estudiados), seguido del ensayo de Corte por Veleta en suelos finos (88,9%), luego CPTU (66,7%) y en cuarto lugar el ensayo SPT, mencionado por el 55,6% de las normas, quías o recomendaciones revisadas.

Se ha desarrollado una propuesta metodológica para la exploración geotécnica marítima en Chile, la cual constituye una mejora frente a lo que se desarrolla actualmente. Se considera una mejora pues se plantean la inclusión o el reemplazo de ciertas metodologías, lo que trae como consecuencia exploraciones que entregan mayor información respecto a las propiedades del suelo, reduciendo la incertidumbre y permitiendo el diseño de infraestructura más económica.

Debido a la exposición a la que están sometidas las distintas tipologías de obras (corrientes, oleajes y vientos), esta propuesta considera de manera diferente las obras a desarrollar en mar abierto y obras en zonas abrigadas. Esta consideración genera que, en particular para obras con antecedentes geotécnicos, los proyectos desarrollados en zonas abrigadas se puedan explorar con una inversión menor, aprovechando la información previa.

Debido a que se pretende rescatar mayor valor de parámetros de resistencia al corte y a las velocidades de ondas sísmicas, se propone a incluir los siguientes ensayos: CPT, SCPT, PS Logging y Corte por Veleta; estos ensayos, exceptuando el SCPT, se encuentran mencionados en la Guía DOP, pero no son recomendados como exigencias mínimas.

Dado que la metodología utilizada hoy en día para determinar el $N_{(SPT)}$ es poco precisa se propone que en los casos donde se mantenga el uso de SPT, se implemente la tecnología complementaria del SPT Analyzer para generar menor incertidumbre en el ensayo, permitiendo una medición de la energía en cada golpe. De este modo se obtendrá un $N_{(SPT)}$ más fiable.

Adicionalmente a los ensayos anteriores, con el objetivo de conocer la distribución de los estratos previo a la exploración invasiva se propone la implementación de la Reflexión UHR. Las técnicas geofísicas como la mencionada, pueden dar un primer enfoque de cómo se presentan los estratos del subsuelo, permitiendo así una mejor distribución de los sondajes marítimos, ubicándolos y direccionándolos en las zonas donde se cubran una mayor cantidad de estratos o donde se observen condiciones

complejas. Así, al efectuar las prospecciones y ensayos se obtendrá información de las zonas más críticas.

Por otro lado, se recomienda que para proyectos que involucren infraestructura o equipamiento con baja tolerancia a deformaciones se incluyan ensayos de presiómetro, con el fin de obtener una respuesta tensión-deformación del suelo más precisa.

También se plantea que toda toma de muestras en proyectos marítimos se realice mediante tubos de pared delgada, generando muestras menos perturbadas, las que al ser ensayadas en laboratorio serán más representativas del suelo estudiado. Como consecuencia de este cambio en las técnicas de exploración se tendrá una mejor caracterización del suelo donde se construirá.

Los consultores de ingeniería se muestran positivos frente a ampliar los métodos de exploración, en particular con respecto a la implementación de ensayos CPT y CPTU. No obstante, el apoyo es menor frente a los ensayos SCPT debido a la dificultad para generar una onda de corte en el fondo marino. Por otro lado, existe un rechazo frente a las metodologías de exploración geofísicas no invasivas para el estudio (reflexión UHR), su uso sólo se considera complementario, mientras que las metodologías de exploración geofísica invasivas, como el PS Logging cuentan con una aceptación mayor.

Debido a la existencia de estudios que validan el uso del ensayo de Corte por Veleta en arenas finas arenosas, y a que las muestras ensayadas en laboratorio siempre se encuentran en mayor o en menor medida perturbadas por su extracción, se propone implementar el uso del Corte por Veleta para el cálculo de la resistencia al corte no drenada (S_u) in situ, bajo la exigencia de que haya evidencia de suelos finos o arenas finas limosas en la zona explorada. Esto trae consigo el beneficio de resultados más certeros que los realizados en laboratorio en muestras obtenidas en terreno a partir de sondajes.

Se propone la creación de una base de datos administrada por la DOP, la cual generará que previo a la exploración exista una instancia, en la cual se revisen los estudios previos del sector. Al tener acceso a dichos estudios la exploración se podrá aprovechar mejor, optimizando la disposición de los sondajes o disminuyendo la cantidad de los mismos, lo que conllevará a una disminución de los costos de la campaña de exploración. Del mismo modo, la incertidumbre respecto al suelo se reduciría, permitiendo el diseño de estructuras menos conservadoras, en consecuencia, más económicas.

Respecto a los ensayos CPTU y SCPT, dado que se observó que el costo asociado a la realización del segundo ensayo es como máximo el 3,3% mayor al valor del CPTU, resulta atractiva la implementación de SCPT o de SCPTu pues de este modo se obtiene mayor información para definir el comportamiento del suelo, debido a la medición de ondas de corte, a un costo muy similar al del ensayo CPTU.

En cuanto a los ensayos SPT y CPTU para zonas de estudio con columnas de agua no superiores a los 10 metros, el coste máximo de los ensayos resulta levemente menor

para ensayos de penetración de cono, por lo tanto para dichas profundidades, la implementación de ensayos CPTU o SCPT resulta la opción más económica y con mejores resultados en la caracterización del suelo.

Por otro lado, para zonas de estudio con columnas de agua de hasta 30 metros, el costo de los ensayos CPTU y SCPT se elevan en exceso, debido a la necesidad de usar una plataforma capacitada para estudiar en tales profundidades; en estos casos resultará una mejor opción el uso de sondaje rotatorio con ensayos SPT montados en plataformas flotantes, sumados a SPT Analyzer, y en caso de necesitar estudiarse el potencial de licuación, incluir ensayo PS Logging. Esta suma de ensayos, en contraposición con lo esperado, representa un coste desde 45% menor al del estudio mediante SCPT, por lo tanto, constituye una opción más económica y con similares resultados técnicos.

Es importante notar que plataformas Jack Up, que permiten la exploración en columnas de agua de 30 metros, no se encuentran disponibles en Chile, por lo que el costo de su uso es mayor debido al transporte desde el extranjero, lo que genera que se eleven los costos de dichas metodologías de exploración. En el mediano plazo, la industria debería considerar la inversión en plataformas de dichas características, con el fin de reducir los costos y comenzar a aplicar las metodologías utilizadas en el extranjero.

Según lo analizado en el caso de estudio, y asumiendo que este comportamiento se repite globalmente se puede concluir que una inversión mayor en la campaña de exploración geotécnica, con el objetivo de hacerla más completa, podría traer como consecuencia costos menores en la construcción de la obra. Por lo tanto, al momento de evaluar un proyecto resulta trascendental observar el costo final del proyecto como un todo, en lugar de ver por separado la exploración geotécnica, los estudios de ingeniería y la construcción.

7.2 RECOMENDACIONES

El presente trabajo se limitó al estudio de obras marítimas, las obras fluviales se dejaron fuera de este trabajo pues no responden a las mismas condiciones ambientales que se dan en el mar, las corrientes, oleajes y mareas se comportan de manera distinta. Se espera, en trabajos futuros poder realizar un análisis de las metodologías utilizadas para los estudios geotécnicos en proyectos fluviales y en caso de ser necesario, plantear una mejora para los mismos.

A futuro, para ampliar el estudio realizado, sería recomendable estudiar y comparar presupuestos para obras específicas, considerando las diferentes prospecciones y ensayos planteados en este trabajo. De este modo se podría comparar con los resultados obtenidos en este trabajo y confirmar o refutar las conclusiones respecto a analizar los proyectos en su totalidad.

Por último, en este trabajo sólo se proponen diversas metodologías para el estudio geotécnico de obras marítimas, se sugiere realizar un estudio posterior con respecto a las cantidades mínimas de exploraciones y ensayos para las mismas obras.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Almazán, J.L., Palomino, M.C. & García, J.R. (2000). Instalaciones Off-Shore para Carga y Descarga de Hidrocarburos. Monoboyas y Campos de Boyas. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, España.
- AQUA (2015). Acuicultura + Pesca. Negocios e Industria. <http://www.aqua.cl/2015/12/21/camanchaca-inauguro-moderno-ponton-que-desaliniza-agua-de-mar-para-sus-procesos/> [Consulta 01-12-2017]
- Anta, J. (2013) Obras Marítimas y Portuarias [Material de Clase]. Universidad de Coruña, Centro de Innovación Tecnológica en Construcción e Ingeniería Civil. La Coruña, Ferrol y Oleiros, España. ftp://ceres.udc.es/Grado_IOP/Tercer_Curso/Obras%20maritimas%20y%20portuarias/Presentaciones/ [Consulta 10-11-2017]
- Armada de Chile (2012). Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR), Capitanía de Puerto de Puerto Montt, Departamento de Intereses Marítimos http://www.abcpuertos.cl/documentos/Habilitacion_Puerto/PMT_EMPORT_12600_349_2012.pdf [Consulta 27-11-2017]
- Armada de Chile (2013). Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR), Capitanía de Puerto de Coquimbo. http://www.abcpuertos.cl/documentos/Habilitacion_Puerto/CQQ_12000-68-56.pdf [Consulta 27-11-2017]
- Armada de Chile (2015). Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR), Capitanía de Puerto de Puerto Natales https://www.directemar.cl/directemar/site/artic/20170215/asocfile/20170215103235/12600_50_190815.pdf [Consulta 27-11-2017]
- ASTM D1586-08a (2008). Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. *ASTM Standard Test Method*. <https://doi.org/10.1520/D1586-11.2>
- ASTM D1587-8 (2015). Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Soils for Geotechnical Purposes. *ASTM Standard Practice*. <https://doi.org/10.1520/D1587-08R12E1.1.4.1>
- ASTM D2573M-15 (2015). Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Saturated Fine-Grained Soils 1. *ASTM Standard Test Method*. <https://doi.org/10.1520/D2573>

- ASTM D4719-87 (1994). Standard Test Method for Prebored Pressuremeter Testing in Soils 1. *ASTM Standard Test Method*. <https://doi.org/10.1520/D4719-07.2>
- ASTM D5778-7 (2007). Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. *ASTM Standard Test Method*. <https://doi.org/10.1520/D5778-07.N>
- ASTM D6635-15 (2015). Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer1. *ASTM Standard Test Method*. <https://doi.org/10.1520/D6635-15.2>
- ASTM D6951-03 (2003). Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications. *ASTM Standard Test Method*. <https://doi.org/10.1520/D6951-03>
- ASTM D7400-14 (2008). Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing 1. *ASTM Standard Test Method*. <https://doi.org/10.1520/D7400-14.1.4.1>
- Autoridad Portuaria de Baleares, [Consulta 22-11-2017]
<http://www.portsdebalears.com/es/>
- Baesler, H. (2016) Proyecto de Construcción de Obras Civiles [Material de Clase]. Semestre otoño 2016. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Santiago, Chile
- Basalto (2018) [Consulta 10-01-2018] <https://basaltoit.com/down-hole>
- BSI Group. (2012). BS 6349-3-2012 Maritime works Part 3 : General – Code of practice for geotechnical design, 3.
- Cámara Chilena de la Construcción, Gerencia de Estudios. (2010). *“Hacia un Nuevo Borde Costero en Chile”*, Chile.
- Codexsa. Geotécnica, geología y control de calidad (2016). [Consulta 10-01-2018] <http://www.codexsa.com/Geotecnia-y-geologia-Codexsa>
- Day, Robert W. (2006). Foundation Engineering Handbook: Design and Construction with the 2006 International Building Code (1° Edition) E-book: McGraw-Hill Professional.
- DOP. (2005). *“El Sistema Portuario de Chile 2005”*. Ministerio de obras Públicas, Chile.
- DOP. (2013). *“Guía de Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras”*. Vol 1 y 2. Ministerio de obras Públicas, Chile.
- DOP. (2014). Procedimientos administrativos y requisitos técnicos para el ingreso y revisión de proyectos. Ministerio de obras Públicas, Chile. Recuperado de <http://www.dop.cl/Documents/Procedimiento de Ingreso y Aprobación Proyectos Privados marzo 2014 V 7.pdf>

DOP. (2014). "Glorario de la Infraestructura Costera y Portuaria". Ministerio de Obras Públicas, Chile.

EAU. (2012) Recommendations of the committee for Waterfront Structures. *Harbours and Waterways, EAU, 8th Edition*.

Empresa Portuaria Austral EPAUSTRAL. Terminal Arturo Prat
<http://www.epaustral.cl/empresa-portuaria/terminales/terminal-arturo-prat/>
[Consulta 27-11-2017]

Empresa Portuaria Valparaíso. Puerto Valparaíso.
<https://www.puertovalparaiso.cl/puerto/infraestructura> [Consulta 27-11-2017]

Eurasia Drilling Company Limited EDC [Consulta 22-11-2017]
<http://www.eurasiadrilling.com/operations/offshore/jack-up-rigs/>

Geoar S.R.L. Estudios Geofísicos [Consulta 10-01-2018]
<http://www.geoarsrl.com/tomografia-sismica-de-refraccion/>

Geometrics. Innovation, Experience, Results. [Consulta 10-01-2017]
<http://www.geometrics.com/applications/geophysical-methods/crosshole-seismic-testing/>

Geotechdata (2008). [Consulta 10-01-2018]
http://www.geotechdata.info/geotest/Lugeon_test.html

Gobierno de Chile (2016). "*Manual de Carreteras Volumen n°3*", Santiago, Chile

Gobierno de Chile, Ministerio de Defensa Nacional, (2014). [Consulta Junio-2017] Fija Nomina Oficial de Caletas de Pescadores Artesanales, Subsecretaría de Marina, Santiago, Chile.

Gobierno de Chile, Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura [<http://www.sernapesca.gob.cl>]

Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, (2009). *Infraestructura Portuaria y Costera Chile 2020*, Santiago, Chile.

Gobierno de España, Ministerio de Fomento. (2008). *Guía de Buenas Prácticas para la Ejecución de Obras Marítimas*. España: Edición Puertos del Estado.

Hurtado, J. (2012). *Administración del borde costero y concesiones marítimas: Principios CChc y Alcances de proyecto de ley*. Cámara Chilena de la Construcción, Chile.

Igeotest. Geoscience Group. [Consulta 30-12-2016]
http://www.igeotest.com/es/knowledge_academy_pslogging.php

- International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (2005). Geotechnical and Geophysical Investigations for Offshore and Nearshore Developments. Swan Consultants Ltd.
- Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H.G. (1977). Stress-deformations and strength characteristics. State of the art report, IX *Internacional Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, 2, 421-497.
- Lemco, Laboratorio de Ensaye y Control de Obras [Consulta 02-01-2018] <http://lemco.cl/services/118>
- MarCom Working Group 144. (2014). *Classification of soils and Rocks for the Maritime Dredging Process*.
- Mercado Público. Plataforma electrónica donde organismos públicos de Chile licitan productos y servicios que necesitan y los proveedores del Estado ofertan (<https://www.mercadopublico.cl/Home>)
- NCh1508 Of2008 (2008) “*Geotecnia- Estudio de Mecánica de Suelos*”, Instituto Nacional de Normalización, INN-Chile, Santiago, Chile.
- NCh2369 (2018) “*Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales*”, Capítulo 12: Estructuras Marítimo-Portuarias de tipo Muelle Transparente”, Instituto Nacional de Normalización, INN-Chile, Santiago, Chile.
- NCh3364:2014 “*Geotecnia- Ensayo de Penetración Estándar*”, Instituto Nacional de Normalización, INN-Chile, Santiago, Chile.
- NORSOK Standard G-001 Rev. 2 (2004) “Marine Soil Investigations”. Standards Norway, Norway.
- NP-ENV 1997-3. (2002). Eurocódigo 7 – Proyecto geotécnico Parte 3: Proyecto asistido por ensayos de campo ENV 1997-3:2002, 156.
- OCDI. (2002). “*Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*”, The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan 3-2-4 Kasumigaseji, Chidoya-ku, Tokyo, 100-0013, Japan.
- OCSA, Estudios Geofísicos. (2016). [Consulta 09-01-2018] <http://www.ocsa-geofisica.com/tecnicas-sismicas.html>
- Oemg Global (2017). [Consulta 04-12-2017] <http://oemg-global.com/aquares-resistivity-surveys/>
- Olguín, R., y Ortúzar, M. (2015). Desarrollo e Implementación de Veleta de Corte a Alta Revolución para sondajes. *Obras y Proyectos*, vol (17), 89–95.

- Randolph, M., Cassidy, M., Gourvenec, S., & Erbrich, C. (2005). Challenges of offshore geotechnical engineering Les défis de la géotechnique offshore. *Xvi Icsmgé*. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-123>
- Robertson, P. K. (2010). Soil behaviour type from the CPT: an update. *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, (May), 8 p.
- Roig, M. (2013). Estudio Integral de Riesgos Laborales en la Actividad de Hincado de Pilotes. (Proyecto Final Integrador para Licenciatura de Higiene y Seguridad en el Trabajo). Universidad de la Fraternidad de Agrupaciones Santo Tomás de Aquino, Mar del Plata, Argentina. Recuperado de <http://redi.ufasta.edu.ar:8080/xmlui/handle/123456789/155>
- ROM 0.5-05 (2005). “*Recomendaciones Geotecnia para las Obras Marítimas y Portuarias*”, MOPTMA, Dirección General de Puertos y Costas. España.
- ROM 1.0-09 (2009). “*Recomendaciones del Diseño y Ejecución de Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. Agentes Climáticos)*”, MOPTMA, Dirección General de Puertos y Costas. España.
- Terratest. [Consultado en 10-01-2017]. <http://www.placadinamica.es/placa-dinamica-light-falling-weight-deflectometer/placa-de-prueba-de-carga-dinamica/>
- Tsukamoto, Y., Hyodo, T., & Fuki, N. (2015). Some recent applications of Swedish weight sounding tests to earthquake reconnaissance investigations, (November, 2015).
- United States Department of the Interior (2015). “Guidelines for Providing Geophysical, Geotechnical and Geohazard Information Pursuant to 30 CFR Part 585”, Bureau of Ocean Energy Management, Office of Renewable Energy Programs, United States of America.
- US Army Corps of Engineers (2001). “Engineering and Design. Geotechnical Investigations”, Department of the Army, Washington, DC. United States of America.1

ANEXOS

TABLA 20. PROSPECCIONES MÍNIMAS PARA OBRAS DE DRAGADO Y DUCTOS. (FUENTE: DOP, 2013)

		AGUAS ABIERTAS Y AGUAS INTERIORES							
		NAVES MAYORES				NAVES MENORES			
TIPOS DE OBRAS		SR	SG	SLA	SV	SR	SG	SLA	SV
Obras de Dragado		Grilla 100 x 100 m en profundidad de dragado	-	Grilla 25 x 25 m	-	Grilla 100 x 100 m en profundidad de dragado	-	Grilla 25 x 25 m	-
Ductos (**)	Ducto de Aducción	Cada 70 m con mínimo de 3	En toda la extensión del proyecto	-	-	Cada 100 m en eje longitudinal con mínimo de 1	-	-	-
	Emisarios	-	-	Cada 50 m en eje longitudinal con mínimo de 5	-	-	-	Cada 50 m en eje longitudinal con mínimo de 5	-
	Tubería de Transporte	-	-	Cada 50 m en eje longitudinal con mínimo de 5	-	-	-	Cada 50 m en eje longitudinal con mínimo de 5	-
	Cables Submarinos	-	-	Cada 50 m en eje longitudinal con mínimo de 5	-	-	-	Cada 50 m en eje longitudinal con mínimo de 5	-
(**): Las prospecciones mínimas para ductos presentadas en esta tabla se refieren sólo a la parte sumergida de éstos.									